

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Л.Д. Писаренко  
(ініціали, прізвище)







## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 92 с., 23 рис., 23 табл., 29 джерел.

ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОННО  
ПРОМЕНЕВЕ УСТАТКУВАННЯ, РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ

**Актуальність роботи.** Зварювання плавленням, особливо електродугове зварювання, є основним технологічним процесом зварювального виробництва. В останні роки традиційні електрозварювальні апарати змінного струму промислової частоти та виконані на їх основі апарати постійного струму замінюються зварювальними апаратами інверторного типу. Такі апарати вимагають спеціалізованих джерел живлення, які відповідають особливим вимогам роботи навантаження. Тому дуже важливим постає питання системи керування такими джерелами живлення для забезпечення роботи джерела та підвищення його якості.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка системи керування для спеціалізованого джерела живлення, що призначене для електронно променевого устаткування. В якості джерела живлення обрано високовольтне джерело живлення для нестаціонарних технологічних навантажень, розроблене інженерами Інституту Електродинаміки НАН України, оскільки в даному пристрої реалізовано поєднання двох сучасних методів обмеження струму, що є перспективним напрямком у сфері електроживлення. Існуюче джерело живлення має аналогову систему керування, яка буде замінена на автоматизовану систему керування цифрового типу.

Для досягнення мети роботи необхідно виконати такі *завдання*:

- проаналізувати існуючі методи регулювання струму у джерелах живлення, що призначені для електронно променевого устаткування;
- проаналізувати переваги мікропроцесорних систем керування та обрати мікроконтролер для реалізації завдання;
- розрахувати включення мікроконтролера до елементної бази джерела живлення;
- написати програмне забезпечення, на основі якого система керування буде відпрацьовувати заданий алгоритм;
- підвищення якості системи керування за допомогою зворотнього зв'язку;
- визначити систему параметрів для пристрою керування;
- розробити печатну плату системи керування;
- показати переваги розробленої системи над існуючою та визначити перспективи їх розвитку;

**Об'єктом дослідження** є мікропроцесорна система керування для джерел живлення.

**Предметом дослідження** є автоматичне регулювання струму у спеціалізованих джерелах живлення для підтримання роботи електронно лучового устаткування.

**Методи дослідження.** Під час теоретичних досліджень розглянуто основні методи регулювання струму в джерелі живлення для електронно променевого устаткування, такі як секціонування вторинної обмотки трансформатора, використання сучасних напівпровідникових приладів та використання зворотнього зв'язку для стабілізації системи та визначення системи параметрів. Для експериментальних досліджень було використано програмне забезпечення: EAGLE, STM32CubeMX, Keil uVision.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розроблено мікропроцесорну систему керування цифрового типу для спеціалізованого джерела живлення, у якому поєднано 2 сучасних метода регулювання струму.
2. Встановлена система параметрів
3. Іноземні розробки
4. Розроблено програмне забезпечення для системи керування на мові програмування C++.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати розробки можна використати та впровадити до існуючого джерела живлення.

						7

## 3MICT

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	10
Вступ .....	11
1.ЕЛЕКТРОННО ПРОМЕНЕВЕ УСТАТКУВАННЯ ЗІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ.....	13
1.1.Особливості застосування електронно променевого устаткування ....	13
1.2.Особливості джерела живлення електронно-променевого устаткування.....	16
2 МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ЕЛЕКТРОННО ПРОМЕНЕВОГО УСТАТКУВАННЯ.....	23
2.1.Регулювання струму за рахунок введення резистивного або індуктивного навантаження у вторинну обмотку трансформатора.....	24
2.2.Регулювання струму за рахунок секціонування обмоток трансформатора.....	26
2.3.Регулювання струму за рахунок зміни магнітного потоку трансформатора.....	28
2.4.Регулювання струму за рахунок напівпровідників у схемі регулювання.....	31
2.5.Постановка задачі.....	37
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТРУМООБМЕЖУЮЧОГО РЕГУЛЯТОРА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ.....	40
3.1.Функціональна схема джерела живлення.....	40
3.2.Складові частини джерела живлення.....	43
3.3.Розробка системи керування.....	48
3.3.1.Блок схема системи керування.....	48
3.3.2.Вибір мікроконтролера.....	52
3.3.3.Розрахунок вхідного стабілізатору напруги.....	54
3.3.4.Підключення живлення до мікроконтролера.....	56





## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	–	Аналого-цифровий перетворювач
БКА	–	Блок автоматики і комутації
ВК	–	Високовольтний кабель
ЕП	–	Електронний промінь
ЕЛП	–	Електронно-лучова пушка
ЕПЗ	–	Електронно-променеве зварювання
ЕТУ	–	Електронно технологічне устаткування
ІДЗС	–	Ідеальне джерело зварювального струму
КЕ	–	Керуючий електрод
НАН	–	Національна Академія Наук
ПП	–	Печатна плата
СК	–	Система керування
СОР	–	Струмообмежуючий регулятор
ЮК	–	Юстувальні котушки

## ВСТУП

Сфокусований електронний промінь в технологічних цілях почали застосовувати з кінця 50-х років минулого століття. При цьому найбільш широке застосування електронно-променеві технології знайшли в зварювальній галузі завдяки можливості отримання високоякісних зварних з'єднань великої товщини за один прохід. Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) в порівнянні з іншими способами може забезпечити переваги по надійності одержуваних конструкцій і за економічними показниками [1]. При використанні сучасних технологій із застосуванням електронно-лучових, плазмових, дугових та лазерних способів обробки металів виникає потреба у розробці спеціалізованих джерел електроживлення. Особливість таких джерел у тому, що вони відображають специфічні властивості електротехнологічних установок. Такими властивостями є виникання різного роду пробоїв електронної пушки, що призводить до короткого замикання; підтримання режиму тліючого розряду, тобто без переходу останнього у дуговий розряд. Також специфічною властивістю може бути обмеження рівня вихідного струму при динамічних збуреннях у навантаженні.

Для вирішення подібних задач існують різні методи та підходи, які будуть розглянуті в даній роботі. Кожен метод має свої переваги та недоліки, проте в кожному методі головною проблемою при розробці подібного джерела електроживлення є регулювання струму, оскільки це є технологічно важкою задачею [2]. Для забезпечення такої можливості розробляють спеціальний струмообмежуючий блок, задача якого змінювати рівень струму та напруги на виході джерела живлення. Для такого регулюючого блоку необхідна система керування, яка буде забезпечувати регулювання у певному алгоритмі, який визначається для конкретного застосування.

У роботі буде розглянуто джерело живлення ДЖЕН 30-15, що розроблене інженерами Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України, що поєднує у собі два сучасних методи регулювання струму [3].

						12

# 1. ЕЛЕКТРОННО ПРОМЕНЕВЕ УСТАТКУВАННЯ ЗІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ

## 1.1. Особливості застосування електронно променевого устаткування

Електронний промінь - потік рухомих в одному і тому ж напрямку по близьким траєкторіях електронів. Він має розміри, значно більші в напрямку руху в порівнянні з поперечною площиною [4].

Електронно-променеві пучки широко використовуються в технологічному обладнанні для нагріву, зварювання, плавки, розмірної обробки, розпилення, фундаментальних і прикладних досліджень, в тому числі в нанотехнологіях. Сутність електронно-променевого впливу полягає в тому, що кінетична енергія електронного пучка (імпульсного або безперервного) перетворюється в зоні обробки в теплову [5]. Так як діапазони потужності і концентрації енергії в промені великі, можливе отримання всіх видів термічного впливу на матеріал: нагрів його до заданих температур, плавлення і випаровування з високими швидкостями. завдяки можливості концентрації теплової енергії у всьому діапазоні термічного впливу, необхідного для розпилення практично будь-якого матеріалу і ведення процесу в вакуумі, забезпечуються чистота оброблюваного матеріалу, а також повна автоматизація обладнання [4].

Електронно-лучові пушки ЕЛП служать для генерації і формування електронного променя. Основні вузли ЕЛП: генератор електронної системи проведення променя (рис. 1.1). Генератор електронів складається з катода, керуючого електрода, або електрода Венельта, анода. Система проведення променя включає юстувальні, фокусуючі та відхиляючі котушки.

Католи виконуються нагрівальними (термокатоли прямого або непрямого напруження) або плазмовими. Матеріал термокатодів - вольфрам, тантал, сплави цих металів з ренієм, гексаборид лантану (LaB6).

						13



установок: забезпечення безперервності технологічного процесу при виникненні пробоїв у вакуумній камері або в електронній гарматі, що призводять до короткого замикання виходу високовольтного джерела; підтримання режиму тліючого розряду без переходу його в дуговий розряд; обмеження рівня вихідного струму при динамічних збуреннях в навантаженні і т.д. Джерело електроживлення повинно забезпечувати ефективну роботу установки в режимах від холостого ходу до короткого замикання і при цьому відрізнятися хорошими динамічними характеристиками.

Застосування пристроїв силової електроніки, що працюють на частоті промислової мережі, для цілей електротехнологій часто не дозволяє реалізовувати всі переваги нових технологічних процесів і обмежує їх продуктивність.

Потужність сучасних електронно-променевих гармат перевищує сотні кіловат при напрузі на навантаженні в кілька десятків кіловольт. Особливістю роботи електронно-променевих гармат є наявність періодичних пробоїв, тому при великих потужностях потрібні мінімізація запасу енергії в системі електроживлення і швидкодіюче обмеження рівня вихідного струму високої напруги.

Ці вимоги вступають в протиріччя з показниками якості електроенергії, зокрема за рівнем пульсацій вихідної напруги, який традиційно забезпечується застосуванням енергоємних електричних фільтрів.

У таких пристроях пробої в ланцюгах гармати призводять до миттєвого розряду ємності фільтра, що є однією з причин виникнення надструмів розряду, що багаторазово перевищують робочий струм і призводять до виникнення дефектів у виробі і на поверхні катода. Наявність великої індуктивності в вихідному ланцюзі джерела сприяє поліпшенню умов переходу короткочасних імпульсних пробоїв в тривалі дугові, що призводить до підвищення частоти дугових розрядів. Крім того,

при пробі напруга може змінюватися зі значною швидкістю, що викликає появу імпульсних струмів зміщення, що сприяють збою і навіть виходу з ладу електронних вузлів. Саме тому важливою особливістю конструкції будь-якого високовольтного джерела живлення, що розрахований на живлення електронно-лучового устаткування, є можливість регулювання робочого струму.

## **1.2. Особливості джерел живлення електронно променевого устаткування**

Зварювальне джерело живлення - електронний пристрій, який забезпечує живлення зварювального кола електричним струмом [6].

Для проведення зварювання зазвичай вимагає великого струму - від 100 до 12000 ампер. Низький струм також використовується; наприклад зварювання двох лез для гоління при струмі 5 ампер з використанням дугового зварювання. Зварювальним джерелом живлення може бути простий автомобільний акумулятор і такий складний прилад, як високочастотний інвертор з використанням транзисторів IGBT технології з комп'ютерним управлінням [6].

Зварювальні апарати бувають постійного струму (CC) або постійної напруги (CV); автомат постійного струму змінює вихідну напругу, підтримуючи при цьому постійний струм і навпаки. Дугове зварювання з металевим електродом і газова вольфрамова дугова зварка використовують джерело постійного струму, а газова дугова зварювання металевим електродом і дугове зварювання порошковим дротом, як правило, використовують постійні напруги [6].

До джерел зварювального струму відносяться:

						16





Зовнішня характеристика джерел живлення (зварювального трансформатора, випрямляча і генератора) - це залежність напруги на вихідних затискачах від величини струму навантаження. Залежність між напругою і струмом дуги в сталому (статичному) режимі називається вольт-амперної характеристикою дуги [7].

Довжина дуги пов'язана з її напругою: чим довше зварювальний дуга, тим вище напруга. Чим крутіше характеристика, тим менше впливає довжина зварювальної дуги на зварювальний струм. При зміні напруги на величину  $\delta$  при крутопадаючій характеристиці зміна струму одно  $a_1$ , при пологопадаючих -  $A_2$  [7].

Figure 1.10 consists of two graphs, (a) and (b), showing the operating characteristics of a vacuum tube.

Graph (a) plots anode current  $I_a$  (mA) on the vertical axis against grid voltage  $U_{g1}$  (V) on the horizontal axis. The vertical axis is labeled  $U, B$  and the horizontal axis is labeled  $I, A$ . Three curves are shown for different anode voltages  $U_a$ : 100 V (solid line), 50 V (dashed line), and 0 V (dash-dot line). All curves start at the same point on the vertical axis (labeled 1) and end at the same point on the horizontal axis (labeled 2). The curves are concave down.

Graph (b) plots anode current  $I_a$  (mA) on the vertical axis against anode voltage  $U_a$  (V) on the horizontal axis. The vertical axis is labeled  $U, B$  and the horizontal axis is labeled  $I, A$ . Three curves are shown for different grid voltages  $U_{g1}$ : 0 V (solid line), -1 V (dashed line), and -2 V (dash-dot line). The curves start at different points on the vertical axis and end at different points on the horizontal axis. The curves are concave up.

У момент запалювання дуги (рис. 1.2.2, а) напруга падає по кривій від точки 1 до точки 2 - до перетину з характеристикою генератора, т. Е. До положення, коли електрод відводиться від поверхні основного металу. При подовженні дуги до 3-5 мм напруга зростає по кривій 2-3 (в точці 3 здійснюється стійке горіння дуги). Зазвичай струм короткого замикання перевищує робочий струм, але не більше ніж в 1,5 рази. Час відновлення напруги після короткого замикання до напруги дуги не повинен перевищувати 0,05 с [7].

Напруга холостого ходу (без навантаження в зварювального ланцюга) при падаючих зовнішніх характеристиках завжди більше робочої

напруги дуги, що сприяє значному полегшенню початкового і повторного запалювання дуги. Напруга холостого ходу не повинна перевищувати 75 В при номінальному робочій напрузі 30 В. Для постійного струму напруга запалювання повинне бути не менше 30-35 В, а для змінного струму 50-55 В. Згідно ГОСТ 7012-77Е для трансформаторів, розрахованих на зварювальний струм 2000 А, напруга холостого ходу не повинна перевищувати 80 В.

Підвищення напруги холостого ходу джерела змінного струму призводить до зниження косинуса « $\phi$ ». Інакше кажучи, збільшення напруги холостого ходу знижує коефіцієнт корисної дії джерела живлення [7].

Джерело живлення для ручного дугового зварювання електродом, що плавиться і автоматичного зварювання під флюсом повинен мати падаючу зовнішню характеристику. Жорстка характеристика джерел живлення (див. Рис. 90, крива 3) необхідна при виконанні зварювання в захисних газах (аргоні, вуглекислому газі, гелії) і деякими видами порошкових дрітків, наприклад СП-2. Для зварювання в захисних газах застосовуються також джерела живлення з полого-зростаючими зовнішніми характеристиками (див. Рис. 90, крива 4) [7].

Основними технічними показниками джерел живлення зварювальної дуги є: зовнішня характеристика, напруга холостого ходу, відносна тривалість роботи (ПР) і відносна тривалість включення (ПВ) в переривчастому режимі.

ПР і ПВ в переривчастому режимі характеризують повторно-короткочасний режим роботи джерела живлення. Величина ПР визначається як відношення тривалості робочого періоду джерела живлення до тривалості повного циклу роботи і виражається у відсотках:  $ПР = t_p / t_{\text{ц}} \cdot 100\%$ , де  $t_p$ - безперервна робота під навантаженням,  $t_{\text{ц}}$ - тривалість повного циклу.

Умовно прийнято, що в середньому  $t_p = 3$  хв, а  $t_{ц} = 5$  хв, отже, оптимальна величина ПР прийнята 60%.

Різниця між ПР і ПВ полягає в тому, що в першому випадку джерело живлення під час паузи не відключається від мережі і при розімкнутій зварювального кола працює на холостому ході, а в другому випадку джерело живлення повністю відключається від мережі.

Отже, загальні вимоги до джерел живлення, що призначені для електронно променевого устаткування, наступні:

- забезпечувати легке запалювання і стабільне горіння зварювальної дуги в період зварювання;
- забезпечувати необхідні для виконуваного технологічного процесу зварювання силу зварювального струму і напруга на дузі;
- мати необхідний вид зовнішньої вольт-амперної характеристики;
- мати динамічні властивості - здатність відновлювати напруга на дузі після моменту короткого замикання (в цей момент напруга дорівнює нулю);
- мати пристрої для регулювання сили зварювального струму.

Для забезпечення нормального запалювання і стабільного горіння зварювальної дуги напруга холостого ходу (зварювальний ланцюг розімкнути) має бути в 2-3 рази більше напруги на дузі, що сприяє її легкому збудженню.

Зазвичай напруга на дузі одно 18-35 В. Одночасно з цим напруга на затискачах джерела при нормальних умовах роботи електрозварника повинно бути для нього безпечним, зазвичай це напруга одно 50-80 В. Динамічні властивості джерела живлення, тобто час відновлення напруги повинно бути не більше 0,05 с. Для забезпечення таких умов під час процесу зварювання у джерелі живлення розроблюють спеціальний блок, що називається струмообмежуючий регулятор.

						21

Наявність регулюючого пристрою в трансформаторі не завжди дозволяє плавно регулювати силу зварювального струму. Тому в ряді випадків послідовно в зварювальну ланцюг включають баластні реостати. Баластні реостати дають можливість плавно регулювати силу зварювального струму і покращують вольт-амперну характеристику джерела живлення для ручного дугового зварювання.

### **Висновки до розділу**

1. Було розглянуто особливості застосування електронно променевого застосування.
2. Основною особливістю було визначено виникання різного роду пробоїв під час зварювання.
3. Враховуючи специфічні вимоги, що відображають властивості електротехнологічних установок, розроблюють спеціалізовані джерела живлення.
4. Було розглянуто особливості джерел живлення для зварювальних установок.
5. Було визначено, що для забезпечення всіх специфічних вимог у джерелах живлення розроблюють спеціальний блок, що відповідає за регулювання струму.

## 2. МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ЕЛЕКТРОННО ПРОМЕНЕВОГО УСТАТКУВАННЯ

Основною задачею регулювання струму в електронно променевому устаткуванні є уникнення короткого замикання. Як і при будь-якому способі зварювання плавленням, величина зварювального струму при ЕЛЗ є одним з основних параметрів режиму зварювання, що істотно впливає на глибину і ширину зварного шва. Міжнародним стандартом ISO 14744-1-6 [9] на підставі великого досвіду промислового застосування ЕЛС обумовлюються вимоги до стабільності і відтворюваності заданого значення струму - не гірше  $\pm 1\%$ , а до пульсаціям струму пучка - не більше 5% (від піку до піку). Вимога малої амплітуди пульсацій струму викликано прагненням знизити утворення бризок і нерівного формування поверхні шва, а також забезпечити високу стабільність глибини непрямого плавлення на металах великої товщини.

Деякі інші істотні вимоги до управління струмом зварювального пучка електронів поки ще не обумовлені нормативними документами, зокрема:

1. Стабільність завдання налаштованого, мінімального струму пучка і його значення.
2. Можливість амплітудної модуляції струму пучка як для технологічних цілей, так і для роботи вдруге - емісійної системи спостереження за формуванням шва і стеження за стиком під час зварювання в режимі реального часу [9];
3. Синхронність управління струмом пучка і прискорювальною напругою з метою мінімізації наслідків пробоїв і розрядів в зварювальній гарматі [9].

На даний момент відомі наступні способи регулювання струму у джерелі живлення для нестаціонарних навантажень [8]:

						23

- введення резистивного або індуктивного навантаження у вторинну обмотку трансформатора;
- зміна кількості витків у первинній або вторинній обмотці трансформатора;
- зміна магнітного потоку апарату для зварювання;
- використання напівпровідникових приладів для регулювання.

## **2.1. Регулювання струму за рахунок введення резистивного або індуктивного навантаження у вторинну обмотку трансформатора**

Перший спосіб, а саме регулювання струму з використанням опору або котушки індуктивності є найпростішим, проте менш ефективним. До тримача зварювальних електродів послідовно підключають потужний резистор або дросель. За рахунок цього змінюється активний або індуктивний опір навантаження, що призводить до падіння напруги і зміни зварювального струму [10].

Регулятори у вигляді резисторів застосовують для поліпшення вольт-амперної характеристики зварювального апарату. В ході реалізації даного методу використовується набір потужних дротяних опорів або один резистор, виконаний з товстого ніхромового дроту у вигляді спіралі. Для зміни опору спеціальним затискачем їх підключають до певного витка проводу. Резистор виконується у вигляді спіралі для зменшення габаритів і зручності використання. Змінний струм в певні моменти часу має нульові або близькі до нього значення. У цей час виходить короткочасне гасіння дуги. При зміні проміжку між електродами і деталлю може статися прилипання або повне її гасіння. Для пом'якшення режиму зварювання і відповідно отримання якісного шва застосовують регулятор у вигляді дроселя, який включається послідовно з держакон у вихідному ланцюзі



апарату. Додаткова індуктивність викликає зрушення фаз між вихідним струмом і напругою. При нульових або близьких до нього значеннях змінного струму напруга має максимальну амплітуду і навпаки. Це дозволяє підтримувати стабільну дугу і забезпечує надійне її запалювання [10].

Величина такого баластного опору становить порядку сотих або десятих часток Ома і, як правило, підбирається експериментально. Для цих цілей застосовують потужні резистори, що використовуються в тролейбусах, підйомних кранах, або спіралі електронагрівачів, шматки товстого високоомного дроту. Баластний опір може включатися стаціонарно або так, щоб потім можна було відносно легко вибрати потрібний струм. Один кінець такого опору підключається до виходу трансформатора, а кінець дроту «маси» обладнується знімним затиском, який легко перекидається по довжині спіралі опору, вибираючи потрібний струм. Промисловістю для зварювальних джерел струму випускаються (або випускалися) спеціальні магазини опорів з перемикачами і потужні реостати [11].

Перевагою такого підходу є те, що баластний опір покращує зовнішню характеристику трансформатора. Трапляються трансформатори, які без баластного опору працюють взагалі вкрай незадовільно.

До недоліків такого роду регулювання треба віднести громіздкість опорів, їх сильне нагрівання при роботі, незручність при перемиканні та невеликий діапазон управління, що є важливим параметром для джерела живлення. У промислових апаратах даний спосіб регулювання струму за допомогою включення активних опорів, через їх громіздкість і нагріву, не набув поширення [11].

## 2.2. Регулювання струму за рахунок секціонування обмоток трансформатора

Другий спосіб регулювання полягає у зміні кількості витків первинної або вторинної обмотки трансформатора. Регулювання напруги при цьому виходить не плавним, а ступінчастим. Даний метод регулювання є одним із найпоширеніших і поділяється на три способи реалізації: секціонування вторинної обмотки трансформатора, секціонування первинної обмотки трансформатора та секціонування напруги, що подається на первинну обмотку трансформатора.

Число витків вторинної обмотки трансформатора можна змінювати порівняно просто, для цього вторинну обмотку розбивають на ряд ступенів (секцій): а, б, в, г (рис. 2.2.1, а), до виводів яких А, Б, В і Г відповідними перемикачами 1, 2, 3 і 4 може підключатися приймач електричної енергії ЗН. Приєднуючи приймач до того чи іншого виводу трансформатора, можна змінювати кількість включених у вторинну обмотку витків, тобто напругу  $U_2$ , що підводиться до приймача. Такий спосіб називають регулюванням на стороні вищої напруги трансформатора [12].

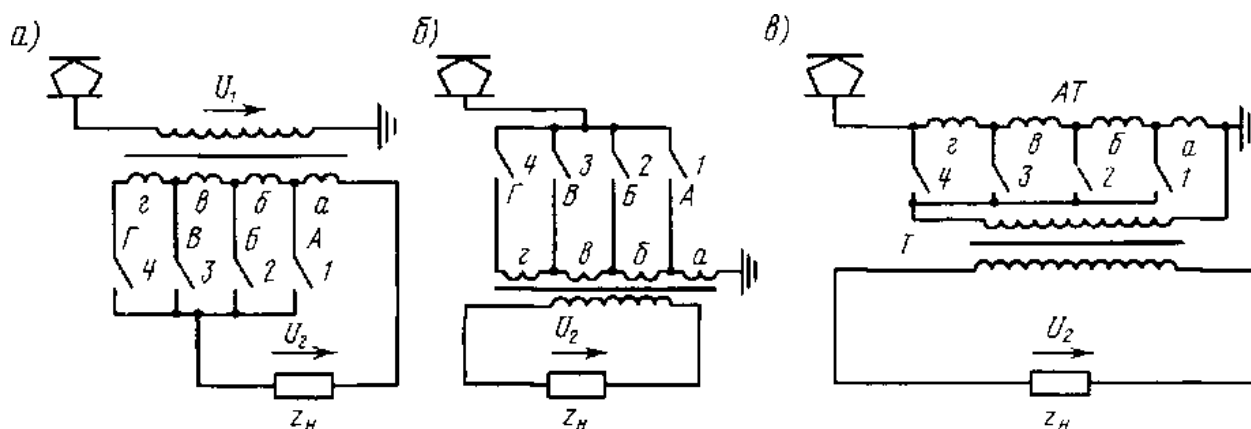


Рис. 2.2.1. Схеми ступеневої зміни вихідного напруги трансформатора на стороні вищої напруги (а) і на стороні нижчої напруги (б і в)

Даний спосіб реалізації методу секціонованого регулювання є найбільш поширеним, оскільки має широкий діапазон регулювання. Недоліками такого способу є великі габарити регульовального пристрою та обмеження по потужності, оскільки для вторинного ланцюга дуже важко підібрати потужні перемикачі, які б витримували струм величиною до 260А.

Регулювання напруги  $U_2$  шляхом зміни числа витків первинної обмотки трансформатора практично можна здійснювати тільки в порівняно вузьких межах. Такий спосіб застосовують на трансформаторах тягових підстанцій з метою компенсації коливань напруги в живильної підстанції мережі (напруга цих трансформаторів може змінюватися від +5 до -10% номінального значення). Використовувати цей спосіб для регулювання напруги в широких межах не представляється можливим. В цьому випадку для збільшення напруги треба було б сильно зменшувати число витків первинної обмотки. Перемикачі провід, що подає живлення від мережі, з виведення Г на виводи В, Б і А (рис. 2.2.1, б). При цьому буде зростати магнітний потік трансформатора, а отже, струм холостого ходу і втрати потужності в сталі. Тому такий спосіб регулювання напруги на е. п. с. не застосовують [12].

Напругу  $U_2$ , що знімається з вторинної обмотки трансформатора Т, можна також регулювати, якщо змінювати будь-яким способом напругу  $U_1$ , що подається на його первинну обмотку. Для цієї мети на е. п. с. використовують регульовальний автотрансформатор АТ (рис. 2.2.1, в). Такий спосіб називають регулюванням на стороні нижчої напруги трансформатора (на первинній стороні). Автотрансформатор може бути виконаний на окремому муздрамтеатрі або у вигляді додаткової обмотки на муздрамтеатрі основного трансформатора.

Кожен з розглянутих способів регулювання напруги має свої переваги і недоліки. При регулюванні на стороні вищої напруги переключають апарати доводиться розраховувати на великі струми, що

сильно ускладнює їх конструкцію. При регулюванні на стороні нижчої напруги вдається значно спростити конструкцію перемикаючих апаратів, так як струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні їх напруженням (практично струми в первинній обмотці трансформатора потужного електровоза становлять 200-300 А, а у вторинній досягають декількох тисяч ампер). Однак маса і габаритні розміри трансформатора при цьому зростають, а його К.П.Д. і коефіцієнт потужності зменшуються. Крім того, перемикання апаратури доводиться виконувати з посиленою ізоляцією і з високим ступенем точності, так як неузгодженість роботи окремих вимикачів на стороні нижчої напруги може привести до важких аварій.

### **2.3. Регулювання струму за рахунок зміни магнітного потоку трансформатора**

Третій спосіб ґрунтується на зміні магнітних потоків розсіювання, наприклад, зміщенням вторинної обмотки. Зварювальний трансформатор має сердечник-муздромтеатр з електротехнічної сталі. На сердечнику розміщені дві обмотки - первинна і вторинна (див. рис. 2.3.1). При обертанні рукоятки за годинниковою стрілкою на верхній панелі зі шкалою (трансформатор ТС - 500) за допомогою передачі гвинт-гайки вторинна обмотка наближається до первинної, магнітний потік розсіювання і індуктивний опір зменшується, зварювальний струм зростає [13]. Таким чином, забезпечується плавне або безступінчасте регулювання зварювального струму. джерела.



(рис. 2.3.2, а) і два магнітних шунта 3, відокремлених один від одного ізолюючими прокладками. Первинна його обмотка 2 складається з двох котушок, з'єднаних паралельно. Кожна з них охоплює три стержня: один зі стрижнів основного муздрамтеатру і два стержня магнітних шунтів. Вторинна обмотка 1 також виконана з двох паралельно включених котушок, намотаних на стрижні основного муздрамтеатру. На стрижнях магнітних шунтів розташована обмотка управління 5, що складається з чотирьох котушок. Вони з'єднані послідовно так, щоб магнітні потоки, створені кожною парою котушок одного магнітного шунта, склалися, а е.д.з. індуковані в них змінним магнітним потоком первинної обмотки, взаємно компенсувалися (рис. 2.3.2, б). Трансформатор працює наступним чином. При відсутності постійного струму в обмотці управління 5 магнітний потік  $\Phi_1$  трансформатора, створюваний первинною обмоткою 2, рівномірно розподіляється між основним магнітопроводом і магнітними шунтами (пропорційно площі їх поперечних перерізів). При цьому у вторинній обмотці 1 індексується мінімальна напруга  $u_2$  [12].

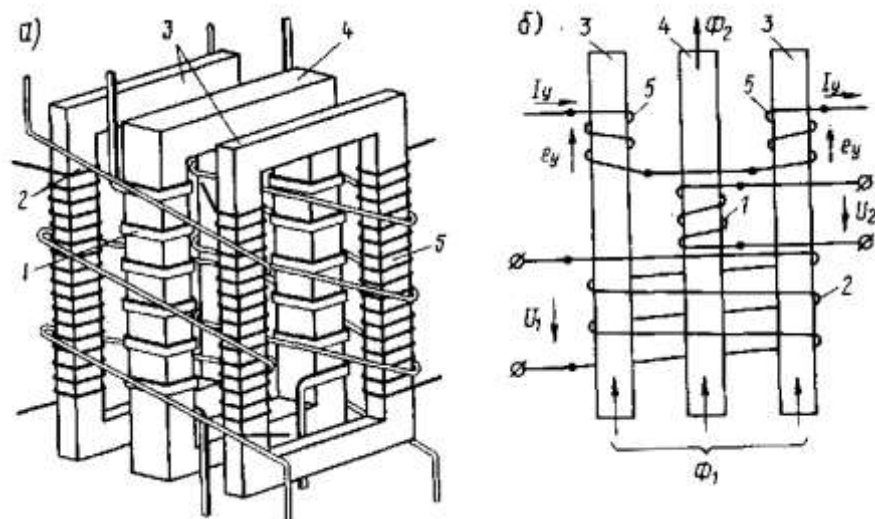


Рис. 2.3.2. Трансформатор з регулюванням напруги шляхом підмагнічування його сердечника постійним струмом (а) і схема включення його обмоток (б)

При протіканні по обмоткам управління постійного струму сердечники магнітних шунтів насичуються і їх магнітне опір зростає. При цьому магнітний потік  $\Phi_2$  первинної обмотки витісняється в основний муздрамтеатр і проходить по ньому потік  $\Phi_2$  збільшується. Це призводить до збільшення напруги  $U_2$ , індексованої у вторинній обмотці. Коли сердечники магнітних шунтів будуть повністю насичені, магнітний потік  $\Phi_2$  в основному муздрамтеатрі буде максимальним і з трансформатора знімається максимальна напруга  $u_2$ . Таким чином, змінюючи струм управління можна плавно регулювати вторинна напруга [12].

Спосіб регулювання струму за рахунок зміни магнітного потоку сердечника є досить надійним та вдалим в теорії, але на практиці він майже не використовується через складність виготовлення трансформаторного сердечника.

## 2.4. Регулювання струму за рахунок напівпровідників у схемі регулювання

Наступний спосіб регулювання струму джерела живлення електронно-лучового устаткування – це використання напівпровідників у схемі регулювання.

Напівпровідникові прилади зробили справжній прорив у зварювальній справі. Сучасна схемотехніка дозволяє використовувати потужні напівпровідникові ключі. Особливо поширені тиристорні схеми регулювання зварювального струму. Застосування напівпровідникових приладів витісняє неефективні схеми управління. Дані рішення підвищують межі регулювання струму. Габаритні і важкі зварювальні трансформатори, що містять велику кількість дорогої міді, замінені на легкі і компактні [14].

Електронний тиристорний регулятор - це електронна схема, необхідна для контролю і регулювання напруги і сили струму, які підводяться до електроду в місці зварювання [15].

Для прикладу розглянемо регулятор на тиристорах. Схема регулятора зварювального струму представлена на рис. 2.4.1.

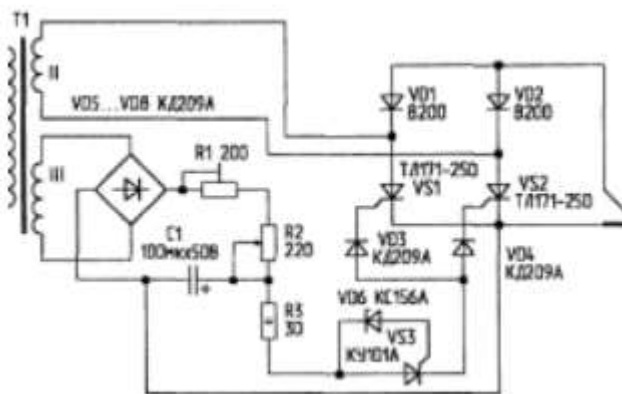


Рис. 2.4.1. Схема регулятора струму на тиристорах

Регулювання здійснюється подачею напруги, що управляє на твердотільне реле - тиристори. Тиристори VS1 і VS2 відкриваються по черзі при надходженні сигналів на керуючі електроди. Напруга живлення схеми формування керуючих імпульсів знімається з окремої обмотки. Далі перетворюється в постійну напругу доданими мостом на VD5-VD8 [14].

Позитивна півхвиля заряджає ємність C1. Час заряду електролітичного конденсатора формується резисторами R1, R2. Коли напруга досягне необхідної величини (більше 5,6 В), відбувається відкриття диністора, утвореного стабілітроном VD6 і тиристором VS3. Далі сигнал проходить через діод VD3 або VD4. При позитивній півхвилі відкривається тиристор VS1, при негативній - VS2. Конденсатор C1 розрядиться. Після початку наступного півперіоду тиристор VS1 закривається, відбувається зарядка ємності. У цей момент відкривається ключ VS2, який продовжує подачу напруги на електричну дугу [14].



Налагодження зводиться до установки діапазону робочого струму налаштуванням опору R1.

Іншим прикладом реалізації даного методу є електронний регулятор зварювального струму, виконаний, на основі одноканального понижуючого конвертера. Застосування такого регулятора дозволяє істотно збільшити ККД системи зварювання, підвищити якість зварювальних робіт і розширити функціональні можливості обладнання: джерело зварювального струму на основі ЕР може забезпечити зварнику можливість використовувати на робочому місці зварювальні процеси MMA, TIG, MIG, MAG.

Для стабілізації струму навантаження подібного регулятора [11] застосовують релейний спосіб регулювання, який рідко використовується в даний час, хоча і має відомі позитивні властивості [12].

Блок-схема регулятора струму джерела живлення зварювального устаткування на струм до 200 А показана на рис. 2.4.2. Як джерело вхідної напруги регулятора використано промисловий зварювальний випрямляч традиційного типу із понижуючим трансформатором промислової частоти. Слід зазначити, що подібне об'єднання промислового зварювального випрямляча з регулятором дозволяє отримати джерело зварювального струму з новими, більш високими характеристиками і функціональними можливостями в порівнянні з традиційним випрямлячем. Причому, такого роду «апгрейд» старих зварювальних випрямлячів може виявитися економічно більш ефективним, ніж їх заміна на нові сучасні інверторні джерела живлення зварювального устаткування професійного рівня.



ІДЗС з топологією, конфігурується як на програмному, так і на апаратному рівнях [17].

Такий спосіб має багато переваг над попередніми, а саме:

- зменшення габаритів регулюючої схеми;
- збільшення діапазону керування струмом;
- можливість керувати великими значеннями струмів;
- простота в реалізації.

Даний метод також поєднують із методом секціонування вторинної обмотки трансформатора для підвищення надійності і стабільності роботи джерела живлення. Приклад такого поєднання можна побачити у джерелі живлення ДЖЕН 30-15, що був розроблений у Інституті Електродинаміки Національної Академії Наук України.

Використання напівпровідникових приладів у модульному джерелі живлення вирішує головну задачу - виключення впливу пробойів на величину струму електронного променя в електронно-променевому обладнанні за рахунок введення регуляторів понижуючого типу і додаткових вентилів з функцією шунтування ланцюга навантаження по виходу регуляторів, які дозволяють в момент виникнення пробоя обмежити струм і потім, при необхідності, розривати на заданий час паузи ланцюг протікання струму в навантаження і зводити до нуля напругу на виході джерела. В результаті такого рішення величина струму електронного променя в електронно-променевому обладнанні не перевищує номінального робочого значення під час пробойів в навантаженні. Більш того, нульові значення вихідного струму джерела під час дугових розрядів (примусові паузи вихідного струму) сприяють їх руйнуванню. Це призводить до підвищення ефективності і надійності роботи джерела живлення.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в високовольтному джерелі живлення для електронно-променевого обладнання, що містить

трифазний високовольтний трансформатор з  $N$  вторинними обмотками,  $N$  трифазних випрямних вузлів з ємнісним фільтром, причому кожна з вторинних обмоток трансформатора підключена до входу одного з  $N$  трифазних випрямних вузлів, а по виходу всі випрямні вузли з'єднані послідовно, введено  $N$  регуляторів понижуючого типу і додатково до кожного з  $N$  регуляторів введені один транзистор, перший і другий діоди, причому позитивна і негативна вихідні клеми випрямного вузла підключені відповідно до позитивної та негативної вхідних клем регулятора, катод першого діода підключений до позитивної вхідної клем регулятора, анод першого діода підключений до позитивної вихідний клем регулятора, колектор першого транзистора і катод другого діода підключені до позитивної вихідний клем регулятора, емітер першого транзистора і анод другого діода підключені до негативної вихідний клем регулятора, вихідні клеми всіх  $N$  регуляторів з'єднані послідовно [18].

Для зменшення впливу паразитних параметрів кабелю підключення джерела до електронно-променевого обладнання в високовольтне джерело живлення для електронно-променевого обладнання в кожен з  $N$  регуляторів введені один резистор і третій діод в розрив ланцюга між позитивною вихідною клемою регулятора і точкою з'єднання колектора першого транзистора і катода другого діода, причому перший висновок резистора і анод третього діода підключені до позитивної вихідний клем регулятора, а другий вивід резистора і катод третього діода підключені до точки з'єднання колектора першого транзистора і катода другого діода [18].

Крім того, для можливості використання елементної бази з більш низьким допустимим напругою в високовольтному джерелі живлення для електронно-променевого устаткування кожен з  $N$  регуляторів понижуючого типу містить перший і другий транзистори, перший і другий діоди, дросель, перший і другий конденсатори, до кожного регулятору додатково введено один діод, причому колектор першого транзистора і

позитивний висновок першого конденсатора підключені до позитивної вхідної клеми регулятора і катода третього діода, емітер другого транзистора і негативний висновок другого конденсатора підключені до негативної вхідної клеми регулятора і анода четвертого діода, емітер першого транзистора підключений до катода першого діода і першого висновку першої обмотки дроселя, колектор другого транзистора підключений до анода другого діода і другого висновку другої обмотки дроселя, анод першого діода і катод другого діода підключені до негативного виходу першого конденсатора і позитивного виходу другого конденсатора, другий вивід першої обмотки дроселя підключено до позитивної вихідної клеми регулятора, до якої також підключені анод третього діода, колектор третього транзистора і катод п'ятого діода, перший висновок другої обмотки дроселя підключений до негативної вихідної клеми регулятора, до якої також підключені катод четвертого діода, емітер третього транзистора і анод п'ятого діода, вихідні клеми всіх N регуляторів з'єднані послідовно [19].

Також для підвищення коефіцієнта потужності на вході джерела живлення і зниження пульсацій вихідної напруги в високовольтному джерелі живлення в його в високовольтному трансформаторі одна половина загального числа вторинних обмоток включена за схемою «зірка», друга половина загального числа вторинних обмоток включена за схемою «трикутник», причому кількість витків в обмотках «зіркою» має бути в разів менше кількості витків в обмотках «трикутником» [18].

## 2.5. Постановка задачі

На елементній базі даного джерела живлення для нестационарних технологічних навантажень, а саме для електронно лучового устаткування, буде розроблена система керування для регулюючого блоку.

						37

При збільшенні перевищенні струму  $\text{COP}$  рівня  $20\text{A}$ , система керування повинна перевести регулятор у режим широтно-імпульсної модуляції ШІМ. Такий режим передбачає наступний алгоритм: при струмі  $20\text{A}$  і більше силові транзистори закриті, а шунтуючі відкриті; при струмі  $15\text{A}$  і менше силові транзистори відкриті, а шунтуючі закриті. Проте в такому режимі регулятор може працювати не більше  $2\text{мс}$ , тому система керування повинна відслідковувати час роботи у даному режимі і на випадок досягання  $2\text{мс}$  в режимі ШІМ віддавати керуючі сигнали на закорочування всіх секцій струмообмежуючого регулятора на час від  $2$  до  $100\text{мс}$ , а саме поки струм у всіх секціях не впаде до рівня  $15\text{A}$ .

Також необхідно забезпечити зворотний зв'язок системи керування, за допомогою якого остання буде отримувати дані про рівень струму у регуляторі від датчика струму типу LA150-P-SP1. Зворотній зв'язок системи керування повинен бути розрахований на отримання даних із

частотою 20 – 50 кГц із точністю аналого-цифрового перетворювача не менше 0,5 %. Швидкодія системи керування має бути не більша за 20 мкс для вчасного реагування на збільшення струму у регуляторі.

### **Висновки до розділу :**

1. Було розглянуто основні методи регулювання струму у зварювальному джерелі живлення.
2. Було обрано поєднання методу секціонування вторинної обмотки трансформатора із використанням напівпровідникових приладів для реалізації спеціалізованого джерела живлення електронно лучового устаткування.
3. Була поставлена задача на розробку системи керування струмообмежуючим регулятором джерела живлення ДЖЕН 30-15, що був розроблений в інституті Електродинаміки НАН України, та який поєднує в собі обидва методи реалізації.

## СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Для того, щоб розробити систему керування регулятором струму, необхідно ознайомитись із загальною функціональною схемою джерела живлення та розглянути всі складові частини цього джерела.

### 3.1 Функціональна схема джерела живлення

У даному джерелі живлення головним вузлом перетворення параметрів електроенергії є спеціалізований трифазний трансформатор ТР1. Первинна сторона трансформатора через блок комутації та автоматики БКА підключена до промислової трифазної мережі 10кВ. Вторинна обмотка виконана у вигляді гальванічно не з'єднаних між собою трифазних секцій у кількості 16 штук. Данні обмотки всередині кожної секції з'єднані у певному порядку: у восьми секціях – у трикутник, у восьми секціях – у зірку. Використання однакової кількості секцій обмоток, з'єднаних у зірку і трикутник, забезпечують рівень пульсацій напруги на виході джерела живлення на рівні 12-пульсної схеми випрямляча [21].

Кожна із секцій вторинних обмоток трансформатора підключена до одного із шістнадцяти струмообмежуючих регуляторів COP1...COP16. Струмообмежуючі регулятори включають у себе трифазний випрямляч за схемою Ларіонова та струмовий обмежувач за схемою понижуючого перетворювача, працюючого у релейному режимі [19]. У такому перетворювачі є силовий транзисторний ключ, увімкнений послідовно до виходу випрямляча, силова котушка індуктивності, обмежений змінний струм протікає через COP та шунтуючий транзистор, увімкнений



Діюче значення напруги на вторинних обмотках силового трансформатора обрано із розрахунком на те, щоб забезпечити амплітудне значення у кожній секції після випрямлення однаковим та рівним 1,875кВ [21].

Об'єднання послідовно по виходу усіх шістнадцяти струмообмежуючих регуляторів дозволяє отримати необхідну робочу напругу на виході джерела живлення на рівні 30кВ [21].

TP1

10кВ

БКА

3\*10кВ

3\*770В

3\*1330В

COP1

1,875кВ

COP2

1,875кВ

...

3\*770В

3\*1330В

COP15

1,875кВ

COP16

1,875кВ

30кВ

БК

ЕТУ

0

0

Оптоволоконный канал

СК

0

Рис. 3.1. Функціональна схема багатомодульного джерела живлення

У кожному струмообмежуючому регуляторі передбачена можливість «закорочування» вихідної напруги на заданий час паузи. Це досягається увімкненням шунтуючого транзистора у вихідному ланцюгу СОР. При цьому вихідний струм і вихідна напруга на виході СОР може стати рівною нулю на період деякої паузи. Алгоритм отримання паузи вихідного струму і напруги заданої тривалості забезпечується за допомогою системи керування СК, яка зв'язана з кожним із струмообмежуючих регуляторів СОР за допомогою оптоволоконного каналу. Наявність оптоволоконного зв'язку забезпечує необхідну гальванічну ізоляцію між вузлами СОР і системою керування [21].

Силовий транзисторний ключ у кожному регуляторі СОР має незалежну релейну схему керування. Якщо струм навантаження (вихідний) регулятора перевищує 20А, силовий транзистор переходить у релейний режим роботи, обмежуючи зміну струму у дроселі та у ланцюгу навантаження у межах 15 – 20А.

В цілому, алгоритм роботи пропонованого джерела наступний. Після увімкнення джерела живлення за допомогою блока комутації БКА джерело готове до роботи. Висока постійна напруга 30кВ, рівна сумарній вихідній напрузі усіх струмообмежуючих регуляторів СОР, через високовольтний кабель ВК за допомогою допоміжних сигналів керування подається на електротехнологічну установку ЕТУ. При максимальній потужності навантаження 450кВт, номінальний робочий вихідний струм складає 15А. При виникненні короткого замикання у технологічному навантаженні ЕТУ вихідний струм джерела живлення залишається обмеженим у межах 15 – 20А за рахунок переходу усіх силових транзисторів СОР у релейному режимі. З моменту виникнення КЗ система керування СК відпрацьовує заданий інтервал часу (час селекції) для розпізнавання характеру короткого замикання в ЕТУ. Якщо після закінчення часу селекції КЗ не зникло, СК дає команду на вмикання усіх шунтуючих транзисторів в регуляторах СОР на заданий час паузи. Увімкнення усіх шунтуючих

транзисторів у регуляторах СОР забезпечує необхідну паузу у вихідній напрузі та струму джерела живлення на рівні нуля. Весь цей час з моменту виникнення КЗ регулятори СОР залишаються у релейному режимі роботи з робочим струмом всередині регулятора 15 – 20А. Після закінчення паузи шунтуючі транзистори вимикаються і величина струму навантаження джерела повертається до початкового номінального робочого значення.

Вимикання джерела живлення від живлячої мережі виконується також за допомогою блока комутації після попереднього вимірювання високої напруги з навантаження.

### 3.2 Складові частини джерела живлення

Струмообмежуючий регулятор (СОР) призначений для формування рівня постійної напруги 1,875кВ і обмеження вихідного струму на рівні 20А при зменшенні опору навантаження до короткого замикання. Також СОР володіє можливістю примусового формування миттєвої паузи (нульового значення) у формі вихідного струму і напруги на заданому проміжку часу, що досягається наявністю силового транзистору, встановленого паралельно до ланцюга навантаження, і відсутністю ємнісних енергонакопичувачів у вихідному ланцюгу. Функціональна схема СОР зображена на рис. 3.2.1.

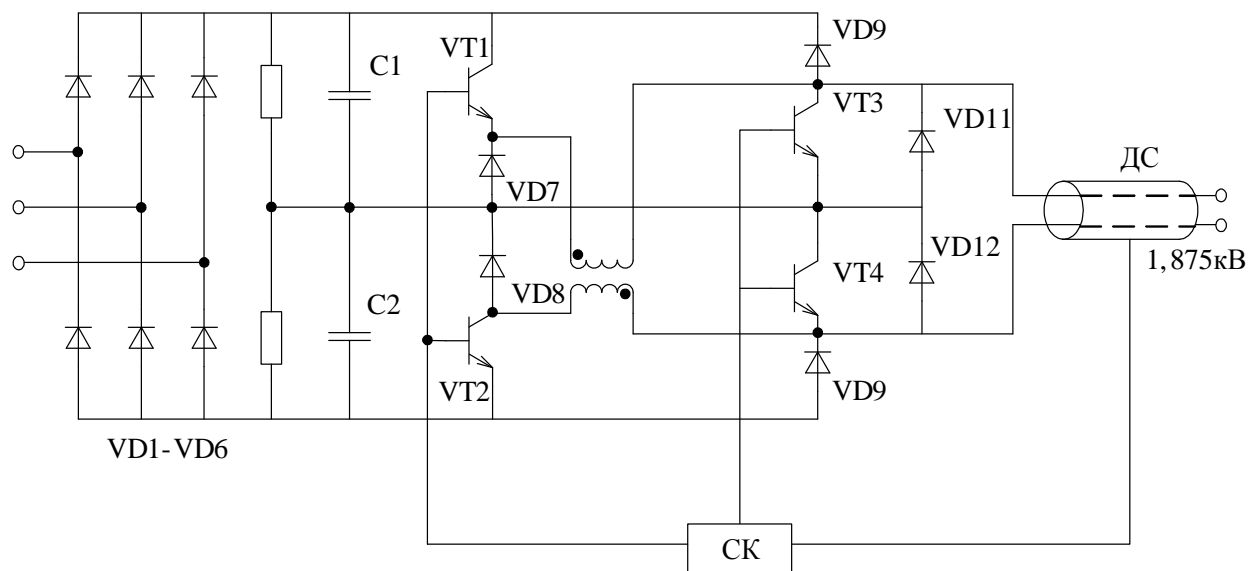


Рис. 3.2.1. Функціональна схема COP (обозначить виводи)

Як видно із рисунка трифазний випрямляч за схемою Ларіонова зібрано на діодах VD1 – VD6. Регулятор має двухсекційне виконання, у якому два перетворювачів понижуючого типу увімкнені послідовно до входу і виходу, а силові дроселі мають жорсткий магнітний зв'язок, знаходячись на одному магнітопроводі. Паралельно вихідним ланцюгам перетворювачів увімкнені шунтуючі транзистори VT3, VT4. Силові транзистори перетворювачів VT1, VT2 керуються системою керування (на рис. показано умовно) і працюють у синхронному режимі. При робочих струмах до 20А данні транзистори відкриті і знаходяться у стані провідності. При перевищенні струмом навантаження рівня 20А, вихідний струм перетворювачів обмежується у межах 15 – 20А внаслідок імпульсного режиму роботи транзисторів VT1, VT2. Інформацію про рівень струму навантаження регулятора має датчик струму ДС, встановлений у вихідному ланцюгу регулятора [19].

У всіх режимах роботи регулятора струм в елементах, що перемикаються, не перевищує номінальних значень струму навантаження джерела живлення – 20А. Напруга на елементах, що перемикають також не перевищує значень вхідної напруги регулятора. Тому, якщо задавати

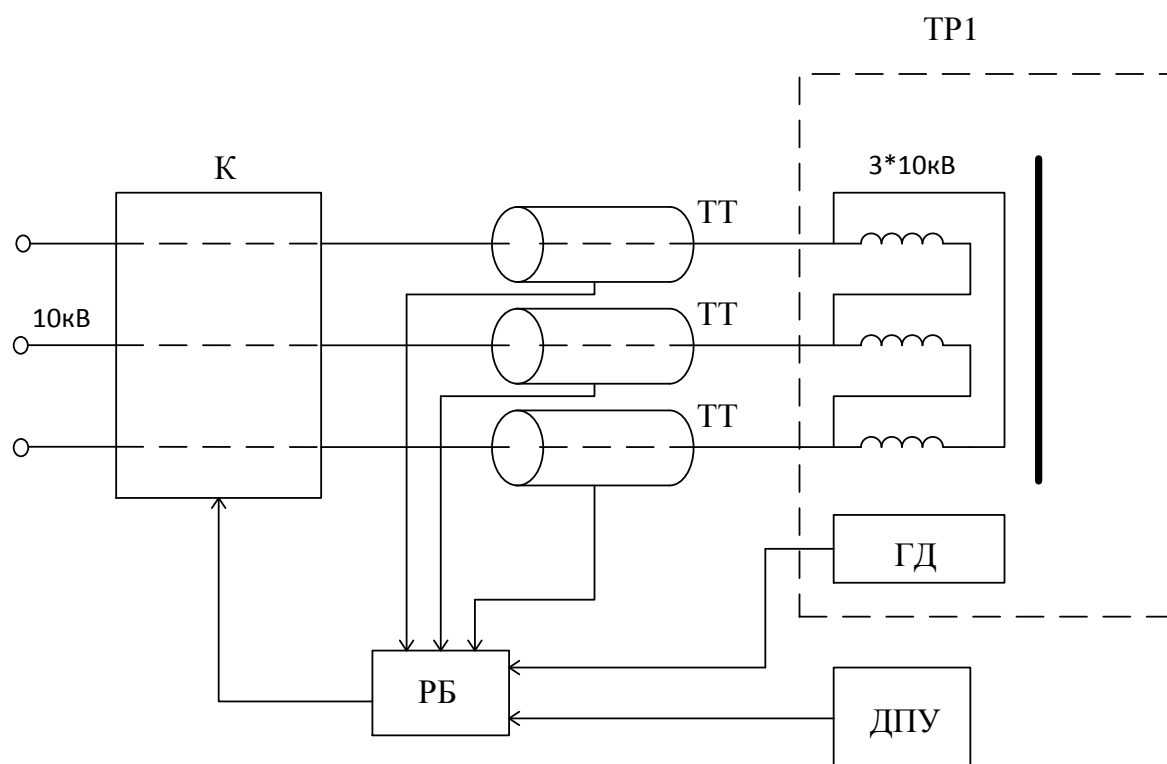
вхідну напругу регулятора на рівні допустимих робочих напруг реальних силових транзисторів, що випускає промисловість, то можна використовувати такі силові прилади у розглянутій задачі в якості робочих елементів.

Так, наприклад, для регулятора СОР максимальними робочими напругами транзисторів VT1 – VT4 є значення 940В. Тому у якості робочих елементів в такому регуляторі використано транзистори IRGP30D120KD. Для такого приладу допустиме значення  $U_{ке} = 1200В$ , допустимий робочий струм 60А при температурі навколишнього середовища  $T = 20$  і 30А при  $T = 100С$ . У якості діодів VD7 – VD12 можна використовувати прилади HFA30PB120, розрахованих на максимальну напругу 1200В і робочий струм 30А [21].

У якості випрямляючих діодів VD1 – VD6 можна використовувати прилади 40EPS12 у послідовному включенні (робоча напруга 1200В, струм 40А) [21].

Блок комутації і автоматики (БКА) призначений для забезпечення безпечного підключення-відключення джерела живлення від промислової мережі 10кВ, а також автоматичне відключення джерела від мережі у випадку аварійної ситуації ( короткого замикання по первинній або вторинній стороні силового трансформатора або інші фактори, які несуть за собою збільшення вхідного струму, вище встановленої межі).

Схема підключення вузлів БКА зображена на рис. 3.2.2, де показано, що на первинній стороні трансформатора встановлений трифазний комутатор напруги К. Даний комутатор керується за допомогою вмонтованої котушки керування від зовнішнього сигналу. При подачі сигналу управління на котушку контактор замикається. При відсутності сигналу управління контактор розімкнутий.



Сигнал управління на контактор подається з сторони релейного блоку РБ в залежності від наступних команд: сигналів з дистанційного пульта управління ДПУ, трансформаторів струму ТС(ТТ) і газових датчиків ГД. Сигнали ДПУ керують підключення-відключення джерела живлення. Трансформатори струму встановлюються в колі кожної фази підведеної напруги до первинної обмотки силового трансформатора і, відповідно, всього джерела живлення, хоча б по одній фазі перевищує задану величину (внаслідок аварії або короткого замикання), релейний блок автоматично дає команду на вимкнення (розімкнення) комутатора напруги [20].

Для забезпечення надійності роботи джерела живлення і запобігання аварійної ситуації можна також використовувати газові датчики ГД, які встановлюють в конструкції силового трансформатора. Газові датчики діагностують появу загорання обмоток силового трансформатора в аварійній ситуації. Спрацювання датчиків ГД подає команду через РБ на розмикання комутатора напруги.

В релейному блоці РБ можна використано прилади типу РТ40, які випускаються промисловістю.

В якості трансформатора струму використано трансформатор типу ТФЗМ 35А з відношенням 50/5. Дані вироби розраховані на вимірювання струму в колах до 35кВ. Максимальний вимірювальний струм в первинній обмотці – 50А, струм у вторинній обмотці – 5А [21].

В якості комутатора напруги використано комутатор типу КВТ 23 10 – 400 – 5- 2У. Комутатор розрахований на робочу напругу 10кВ, робочий струм 400А, струм відключення при короткому замиканні до 5кВ. Габаритні розміри 340×380×285(мм), вага 30 кг, робочий діапазон температури навколишнього середовища -40°С+40°С, робочий ресурс – 100тис. циклів при номінальному струмі і 1млн. циклів при холостому ході [21]. Параметр «струм відключення при КЗ» необхідно підбирати виходячи з розрахованого значення струму короткого замикання в первинній обмотці в залежності від потужності конкретної лінії електромережі. Необхідно, щоб величина цього параметра в найменування типу комутатора була вища розрахованого значення КЗ [19].

Силовий трансформатор ТР1 призначений для перетворення трифазної напруги у вигляді окремих секцій із 16 штук. Послідовне їх об'єднання за постійним струмом після відповідних випрямлячів струмообмежуючих регуляторів дозволяють отримати високу напругу 30кВ.

Силовий трансформатор повинний бути виготовлений виходячи із значення встановленої потужності 500кВт. В якості ізоляційного матеріалу повинний бути використаний масляний діелектрик [21].

### 3.3 Розробка системи керування

#### 3.3.1. Блок схема системи керування

За поставленою задачею було розроблено блок схему системи керування, на якій відображено взаємодію останньої із струмообмежуючим регулятором в масштабі всього джерела живлення.

Блок схема системи керування СОР зображена на рис.3.3.1.

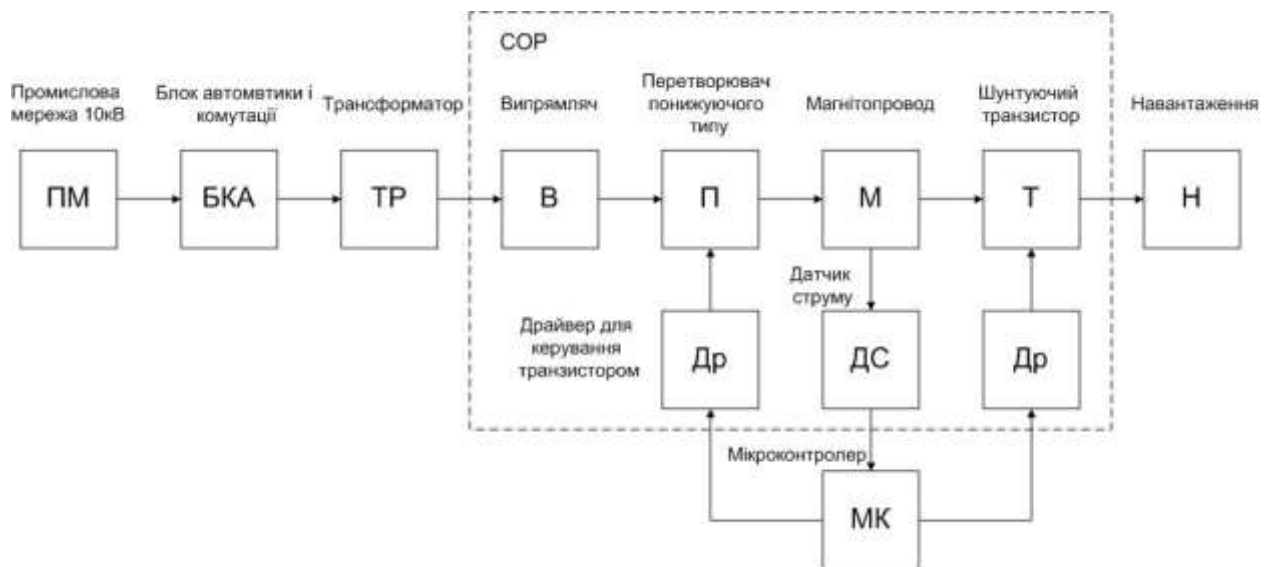


Рис. 3.3.1. Блок схема системи керування СОР

Першим блоком у блок схемі є промислова мережа 10кВ, до якої підключається джерело живлення. За безпеку такого підключення відповідає блок автоматики і комутації, який також забезпечує автоматичне відключення джерела від мережі в аварійній ситуації. Після включення джерела живлення до промислової мережі напруга потрапляє у силовий трансформатор, вторинна обмотка якого розділена на 16 секцій, кожна з яких підключена до струмообмежуючого регулятора СОР (на блок схемі зображено тільки одну секцію СОР для зручності та більшої деталізації принципу роботи системи керування регулятора). Трансформована змінна напруга потрапляє до випрямлячу, з якого вже постійна напруга потрапляє перетворювача понижуючого типу, за



Система керування регулює роботу струмообмежуючого регулятора СОР, шляхом відкривання та закривання силових та шунтуючих транзисторів. Даний регулятор може знаходитись у двох станах: увімкнений та вимкнений. Робота СОР у першому стані означає, що силові транзистори відкриті та проводять струм, а шунтуючі транзистори – закриті і не проводять струм. В другому стані СОР, що називається вимкнений – силові транзистори закриті і не проводять струм, а шунтуючі транзистори – відкриті. Перший стан має два режими роботи: основний режим роботи пристрою та режим широтно-імпульсної модуляції. В основному режимі роботи силові транзистори постійно знаходяться у відкритому стані, а шунтуючі транзистори постійно закриті. В режимі широтно-імпульсної модуляції транзистори попарно відкриваються та закриваються, відповідно зворотному зв'язку, що надходить з датчика струму. Якщо струм більший за 20А, то силові транзистори відкриті та пропускають струм, а шунтуючі транзистори – закриті. Якщо струм менший за 15А, то силові транзистори закриті, а шунтуючі транзистори – відповідно відкриті. Для забезпечення даного режиму роботи

синхронізовано драйвери, які керують транзисторами, щоб останні відкривалися та закривалися одночасно. Такий режим роботи забезпечує утримання струму в межах 15 – 20А у випадку зменшення опору навантаження.

Основна задача системи керування - це підтримання постійної напруги на рівні 1,875кВ і обмеження вихідного струму на рівні 20А на випадок зменшення опору навантаження до короткого замикання. Тому більшу частину робочого часу система керування перебуває в основному робочому режимі увімкненого стану, в якому силові транзистори постійно відкриті, а відповідно шунтуючі – закриті. У випадку перевищення вихідного струму рівня 20А система керування переводить транзистори у режим широтно-імпульсної модуляції та підтримує струм у межах 15 – 20А. В такому режимі джерело живлення тривалий час працювати не може, оскільки такі зміни струму означають зменшення опору в навантаженні, що призводить до короткого замикання. Тому дана ситуація передбачена, і в алгоритмі керування визначений максимальний проміжок часу, що дорівнює 2мс для роботи джерела в даному режимі.

Для виміру рівня струму у вихідному колі струмообмежуючого регулятора використовується датчик струму ДС. Виміри з датчика струму будуть подаватися на аналого-цифровий перетворювач АЦП, який вбудовано у мікроконтролер. Дані вимірів струму, зняті з ДС будуть постійно перевірятися логікою мікроконтролера. У випадку перевищення струму 20А струмообмежуючий регулятор буде переведено у режим широтно-імпульсної модуляції, а таймер включено на зазначений час – 2мс. Якщо в цей проміжок часу струм стабілізується на рівні 15 – 20А, то таймер буде вимкнено та переведено в початкове положення, а струмообмежуючий регулятор знову повернеться у початковий увімкнений режим, коли силові транзистори постійно відкриті та проводять струм, а шунтуючі – відповідно закриті. В іншому випадку по закінченню часу таймер переведе СОР у вимкнений стан від 2 до 100мс.

Повний алгоритм роботи зображено на рис.3.3.2.

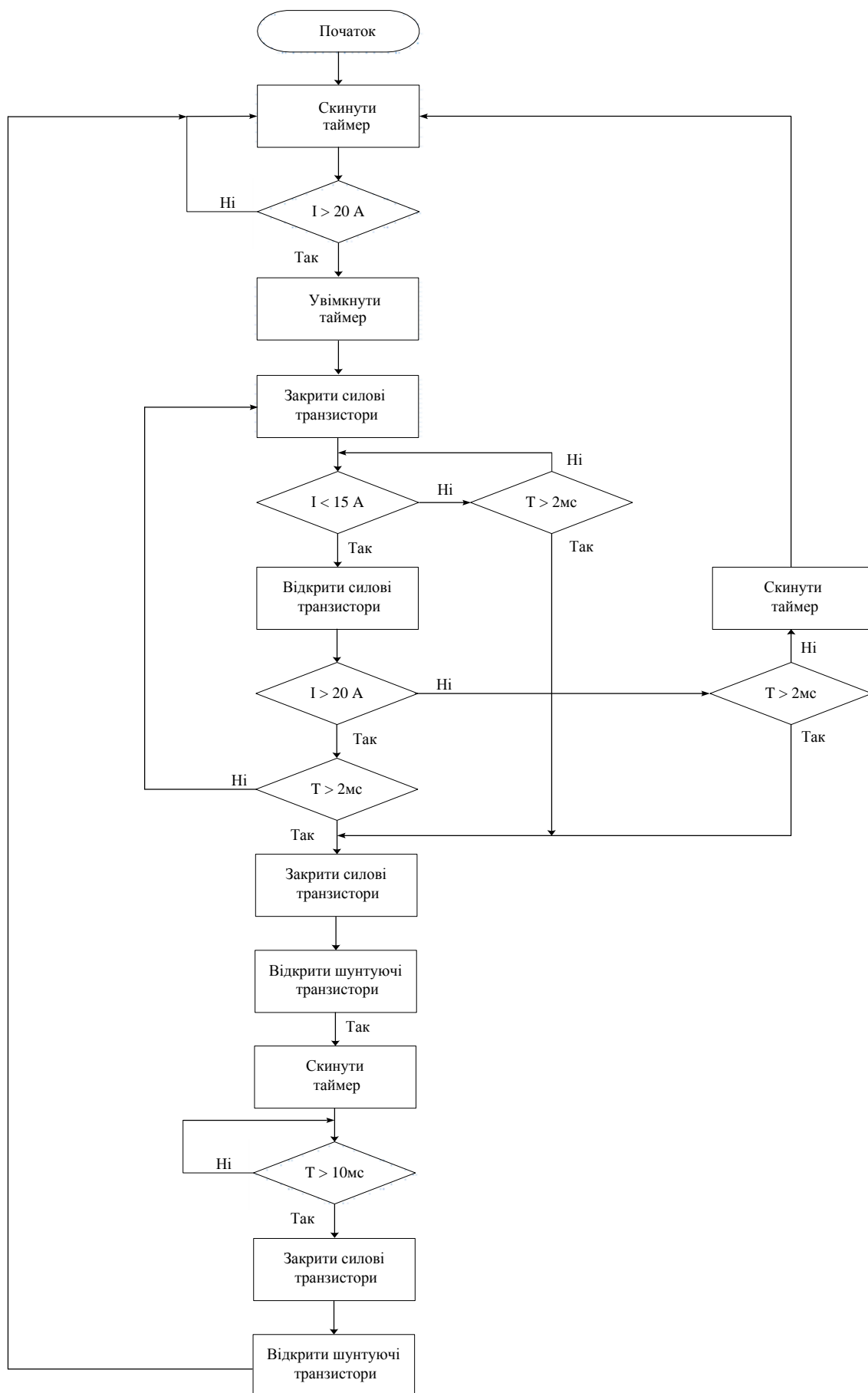


Рис. 3.3.2 Блок схема алгоритму роботи системи керування

### 3.3.2. Вибір мікроконтролера

Для виконання функцій системи керування обраний мікроконтролер повинен мати вбудований таймер та аналого-цифровий перетворювач, що здатний оброблювати 16 сигналів одночасно. Для швидкого виконання вимірювань та логічних операцій, бажана частота роботи повинна бути не менше 16МГц.

Крім вище зазначених вимог необхідно розглянути загальні критерії, які потрібно врахувати при виборі пристрою: доступність пристрою, тобто обраний пристрій повинен існувати у достатній кількості, вироблятися на постійній основі для того, щоб бути доступним для його купівлі, а також мати підтримку виробника, як технічну, так і інформаційну. Також бажано обрати пристрій, ціна якого буде відповідати рівню його необхідності, а якість виконання буде на відмінному рівні. Ще одним важливим критерієм є вбудована система команд, які полегшують роботу з ним, тому на це буде звернута увага. Продукти даної категорії адаптовані під різні мови програмування, тому враховуючи, що програма буде написана на мові С, мікроконтролер повинен бути адаптованою до цієї мови програмування.

В цілому мікроконтролери можна розділити на групи 8, 16 і 32разрядних за розміром їх арифметичних та індексних регістрів. На сьогоднішній день, на ринку мікропроцесорних систем найпопулярнішими виробниками є такі компанії, як Intel, Motorola, Microchip, Atmel та STMicroelectronics.

Мікроконтролер Intel 8051, випущений в 1980 році, став класичним зразком пристроїв даного класу. Цей 8-бітний чип поклав початок цілому сімейству мікроконтролерів, які панували на ринку аж до недавнього часу [22].

Аналоги 8051 випускали радянські підприємства в Мінську, Києві, Воронежі, Новосибірську, на них виросло ціле покоління вітчизняних розробників [22].

						52

Більшість фірм виробників мікроконтролерів і сьогодні випускають пристрої, засновані на цій архітектурі. Серед них Atmel, Maxim, Philips, Dallas, OKI, Siemens - можна перерахувати понад півтора десятка імен [22]. Але 51-е сімейство здає свої позиції більш молодим і досконалим мікроконтролер.

За кордоном мікроконтролери від компанії Motorola займають пануюче положення на ринку, проте у нашій країні їх популярність не дуже висока, через відсутність достатньої кількості доступних навчальних матеріалів і засобів розробки.

Продукцію фірми Microchip можна придбати за рекордно низькою ціною, які не поступаються продуктивністю та не вимагають дорогого програматора. Такі чіпи мають хороші порти, але все інше в них зроблено дуже незручно, а архітектура залишає бажати кращого [23]. Ще одним недоліком є обмежена система команд.

Компанія STMicroelectronics мають також широку популярність, завдяки високій надійності та низькому енергоспоживанні своєї продукцію. Також приваблює низька ціна і широкий модельний ряд, тому далі будуть розглядатися прилади даного виробника.

STM32 - це мікроконтролер, побудований на ядрі ARM Cortex-M3. Дане ядро має багато переваг, які будуть перераховані нижче, але його основна перевага на сьогоднішній день – універсальність [24]. За два роки Cortex-M3 став індустріальним стандартом. Про це свідчить те, скільки виробників, що приєдналися до даної архітектури.

Усередині серій STM32F-1, STM32F-2 і STM32L pin-to-pin сумісність повна. Якщо ми говоримо, наприклад, про серію STM32F-1, то мова йде про більш ніж 90 мікросхемах, розділених на п'ять сімейств по застосуванню, з повною pin-to-pin сумісністю [24].

Осно́вані на ARM Cortex-M4 мікроконтролери серії STM32 F4 є продовженням провідною лінійки STM32, володіючи ще більш високою продуктивністю.

Важливо відзначити, що при використанні STM32 розробнику досить рідко доводиться мати справу з архітектурою МК, оскільки найчастіше всі процедури виконуються з використанням добре документованої високорівневою C- або C++ API від ST Microelectronics.

На борту міститься три АЦП і два одноканальних ЦАП. АЦП має хорошу роздільну здатність 12 біт і дуже високу швидкість перетворення, складову 2,4 МСемпла в одиночному режимі і 7,2 МСемпла - в потрібному режимі [24]. Максимально доступне число аналогових каналів – 24, що повністю задовольняє вимогам зворотного зв'язку системи керування.

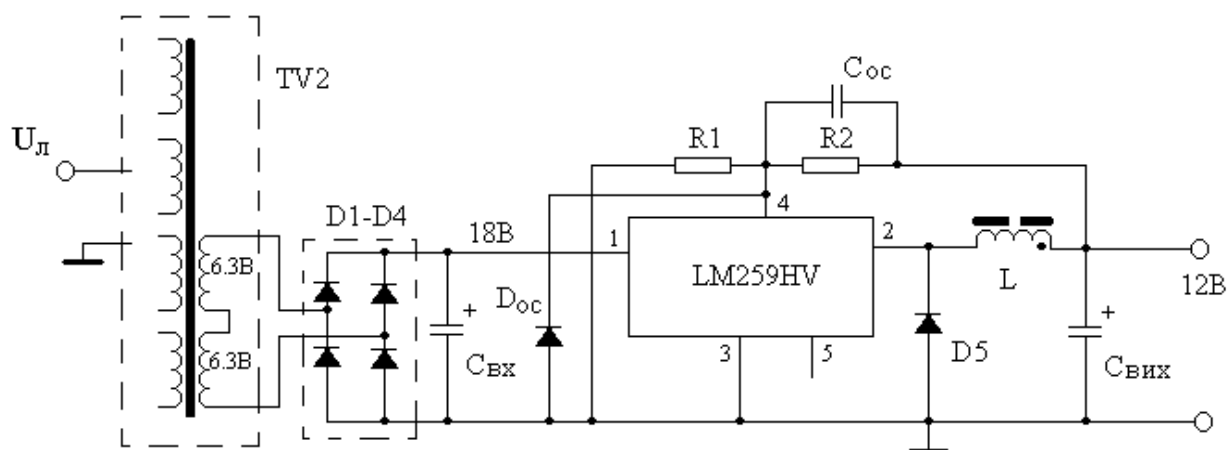
Отже, враховуючи всі вимоги до мікроконтролера обрано пристрій STM32F405VG від компанії ST Microelectronics.

### 3.3.3. Розрахунок вхідного стабілізатору напруги

Вхідний стабілізатор напруги системи керування призначений для формування напруги живлення 12В вузлів системи керування. До даних вузлів відносяться внутрішні кола системи керування та коло живлення вентилятора системи повітряного охолодження ТОС. У якості вентилятора вибрано пристрій типу KDE 1212PT-6A з напругою живлення 12В і струмом споживання 0.45А, продуктивністю 152 м<sup>3</sup>/год.

Розрахункова потужність споживання ланцюгів системи керування становить 4Вт. Загальна потужність споживання спільно з вентилятором становить не більше 10 Вт. Тому доцільним видається використовувати в основі вхідного стабілізатора для живлення системи керування мікросхему LM2592HV [25].

Схема вхідного стабілізатора з використанням даної мікросхеми показана на рис.3.3.3, а її внутрішня функціональна схема показана на рис.3.3.4.



Дана мікросхема містить внутрішній елемент перемикачання зі своєю системою керування і дозволяє реалізувати стабілізатор понижуючого типу. Зовнішніми елементами тут є дросель L і діод D5.

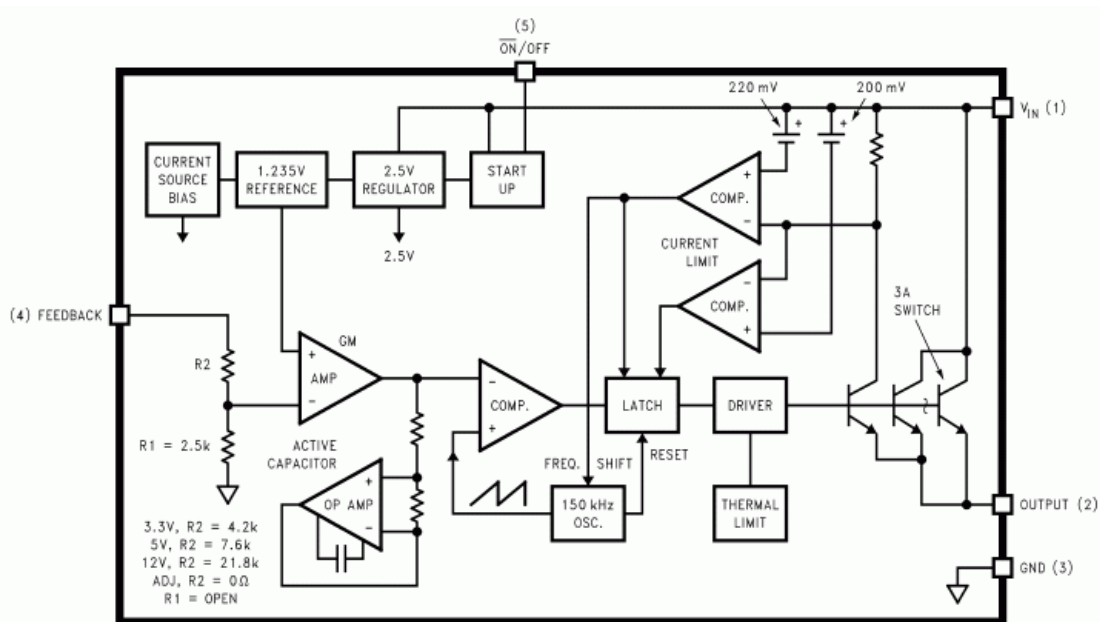


Рис.3.3.4. Функціональна схема вхідного стабілізатора

Резистори R1, R2 формують ланцюг зворотного зв'язку. За допомогою вибору параметрів цих резисторів задається необхідна величина вихідної напруги такого стабілізатора. При цьому необхідно, щоб потенціал на виводі (4) "OC" мікросхеми відповідав значенню 1.23В (див. Data sheet LM2592HV) [25].

Як діод D5 можна використовувати швидкодіючий діод Шотткі 31DQ06 з допустимою зворотною напругою 60 В і з прямим струмом 3.3А. Як дросель L можна використовувати стандартний дросель виробництва Murata серії 1400 індуктивністю 100мкГн і з максимальним допустимим струмом 5.4А. Як діоди D1-D4 досить використовувати стандартний діодний міст виробництва International Rectifier KBPC101 (зворотна напруга 100В, прямий струм 3А).

### 3.3.4. Підключення живлення до мікроконтролера

Спочатку необхідно під'єднати до мікроконтролера живлення. Враховуючи, що стабілізатор напруги розрахований на напругу 12В, а згідно з документацією мікроконтролера STM32F405VG максимальна напруга живлення дорівнює 3.3В, необхідно розробити стабілізатор напруги для мікроконтролера із входною напругою 12В та вихідною 3.3В. Для виконання такої задачі використано інтегральний імпульсний стабілізатор напруги LM2574 [26]. Даний стабілізатор підключений відповідно до його документації, приклад підключення зображено на рис.3.3.5.

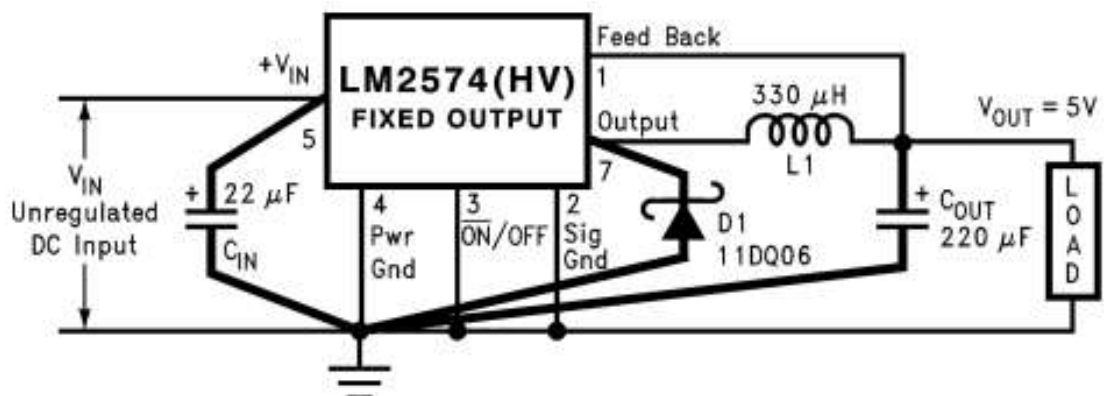


Рис.3.3.5. Інтегральний імпульсний стабілізатор напруги



В якості конденсатору  $C_{IN}$  обираємо K10-17Б з номінальною ємністю 22пФ, робочою напругою 75В та позначаємо на принциповій схемі, як C43, а конденсатору  $C_{OUT}$  - K10-17, з номінальною ємністю 220пФ, робочою напругою 25В та позначаємо – C34. В якості діоду D1 обираємо VS-11DQ06 та позначаємо на схемі, як D41. В якості індуктивності L1 обираємо дросель RLB0914-331KL з номінальним значенням індуктивності 220 мкГн та позначаємо на принциповій схемі, як L3.

Тепер, коли стабілізатор напруги 3.3 В розрахований, необхідно правильно під'єднати мікроконтролер до живлення. STM32F405VG має подвійне живлення: цифрове (виводи VCC і GND) та аналогове (виводи AVCC і AGND, який часто позначають просто GND) [27].

Виводи живлення та землі необхідно з'єднати конденсаторами C40 і C41, ємністю в 0.1 мкФ. Виводи GND з'єднуємо із землею, а виводи VCC і AVCC під'єднаємо до вхідного стабілізатору напруги. Але враховуючи, що нам необхідно буде використовувати аналого-цифровий перетворювач, то вивід AVCC з'єднуємо до живлення через резистор R46, опором 100 Ом (рис. 3.3.6).

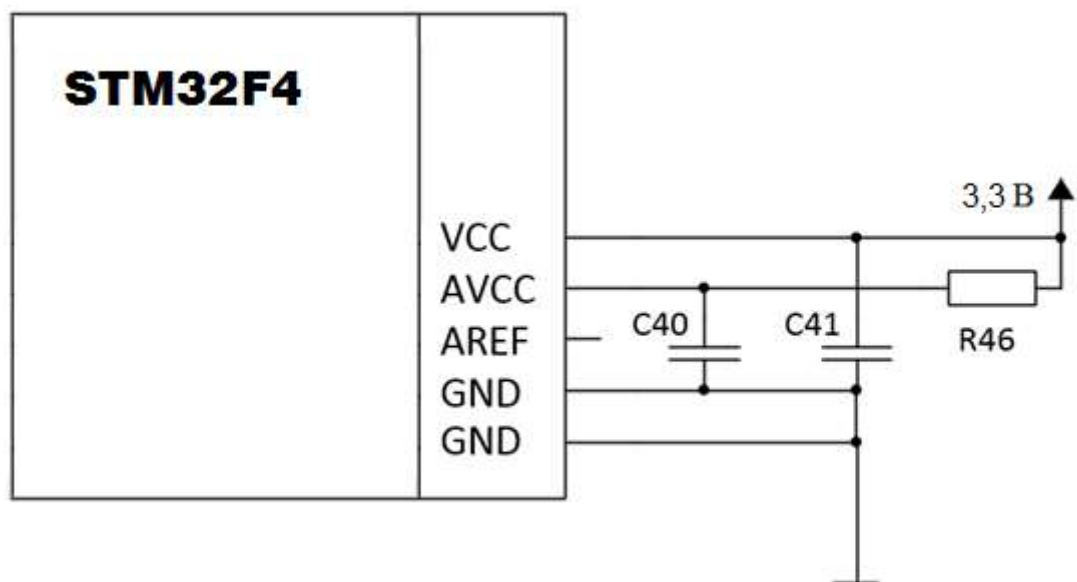


Рис.3.3.6. Підключення живлення до мікроконтролера

Порт RESET потрібно з'єднати із живленням через резистор R47, опором 10кОм.

$$\frac{1}{50000} = 20 \text{ (мкс)}.$$

Отже, знаючи потрібну швидкодію, можна обрати частоту 24 МГц, при якій за 1 мкс можна виконати 24 операції і відповідно 480 операцій за 20мкс, чого буде достатньо для швидкості обробки даних логікою мікроконтролеру, але враховуючи що система керування буде обробляти сигнали від усіх 16 регуляторів, потрібно налаштувати мікроконтролер на його максимальну частоту 168 МГц.

Для отримання такої тактової частоти необхідно під'єднати зовнішній кварцовий резонатор з частотою 24 МГц. Кварцовий резонатор підключено згідно документації пристрою та налаштовано у програмному середовищі STM32CubeMX від виробника. Дана програма надає графічний інтерфейс для налаштування мікроконтролера, а також для генерації програмного коду. На рис. 3.3.7 зображено конфігурацію налаштування частоти роботи мікроконтролера, що була налаштована у даному програмному забезпеченні.

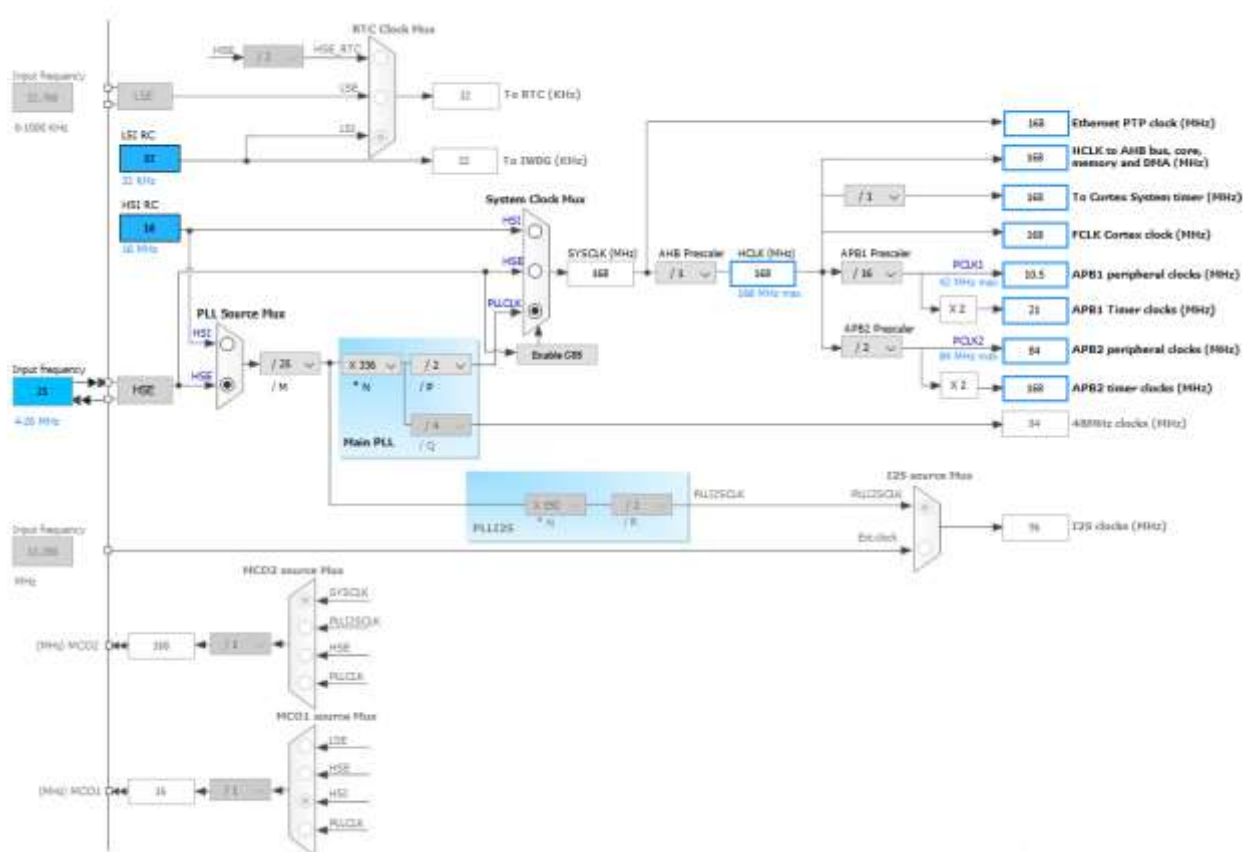


Рис.3.3.7. Конфігурація налаштування частоти роботи мікроконтролера

Включення кварцового резонатора до мікроконтролера зображено на рис. 3.3.8. Згідно документації для роботи на даній частоті потрібно підключити два конденсатори до резонатора ємністю 22пФ, які зображені на рис. як C33 та C32.

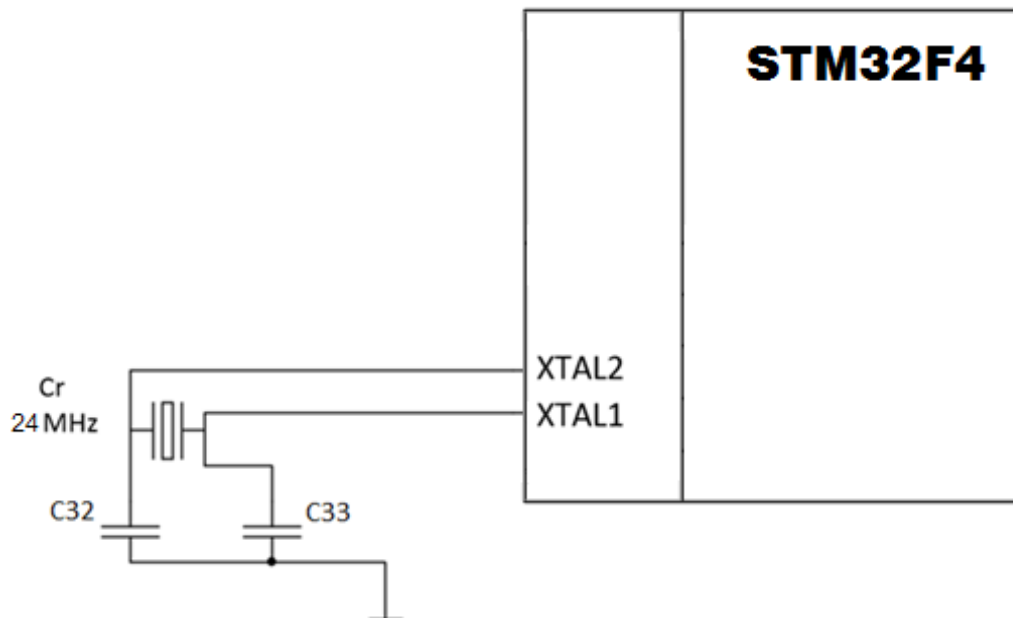


Рис.3.3.8. Підключення кварцового резонатора.

### 3.3.6. Налаштування АЦП мікроконтролера

В даному мікроконтролері 3 аналого-цифрових перетворювача, перші два яких мають по 16 портів, а третій – 8 [27]. В нашому випадку нам необхідно оброблювати всього 16 сигналів одночасно, тому використаємо всі порти ADC1.

Максимальна напруга, яка може поступати на АЦП дорівнює 3,3 В. Аналого-цифровий перетворювач може вимірювати тільки напругу, тому необхідно розрахувати напругу на АЦП при струмах в регуляторі 20А та 15А, для порівняння вимірів.

Сигнал поступає на аналого-цифровий перетворювач з датчика струму LA150P-SP1, робота якого базується на ефекті Холла [28]. Його конструкція включає в себе магнітопровід, що має зазор і компенсаційну

обмотку, електронну плату обробки сигналів і датчик Холла. Коли струм протікає по шині, з'єднаної з першим елементом, то виникає магнітна індукція. Сигнал посилюється, а потім передається в компенсаційну обмотку. Вихідний сигнал датчика повністю повторює форму сигналу вимірюваного струму.

Іншими словами, датчик струму вимірює струм у регуляторі та формує власну напругу, яку вимірює АЦП. Напруга, яку формує датчик струму визначається за наступною формулою:

$$U_{\text{д.с.}} = I * \frac{w_1}{w_2} * R_{\text{д.с.}},$$

де  $I$  – струм, який дорівнює струму в навантаженні;

$w_1$  - кількість витків первинної обмотки;

$w_2$  - кількість витків вторинної обмотки;

$R_{\text{д.с.}}$  - опір резистора, на якому формується напруга.

Кількість витків первинної обмотки обраного датчика струму дорівнюють 1, а кількість витків вторинної обмотки – 2000. Враховуючи, що максимальна напруга, яка може поступати на аналого-цифровий перетворювач дорівнює 3,3 В, прийmemo значення напруги 3В при струмі 20А в основному режимі роботи струмообмежуючого регулятора. Отже, необхідно визначити опір резистору, на якому буде формуватися ця напруга. На електричній принциповій схемі даний резистор позначається, як R15.

$$R_{15} = \frac{U_{\text{д.с.}} * w_2}{I * w_1}$$

Підставляємо числові значення:

$$R_{15} = \frac{3 * 2000}{20 * 1} = 300 \text{ (Ом)}.$$

Тепер знаючи опір резистора R15 можна порахувати значення напруги, яке буде надходити до АЦП мікроконтролера при струмі в регуляторі 15А:

$$U_{д.с.} = 15 * \frac{1}{2000} * 300 = 2,25 \text{ (В)}.$$

Тепер знаючи значення напруги на АЦП потрібно розрахувати значення, які з АЦП будуть отримані у коді програми. Для цього потрібно визначити ціну поділки: оскільки АЦП 12-бітний, то діапазон вимірюваних значень буде 4095; максимальна напруга, яку можна подати на АЦП дорівнює 3,3 В; тепер потрібно поділити максимальну напругу на діапазон вимірюваних значень, тобто:

$$\frac{3,3}{4095} = 0,0008 \text{ (В)} - \text{ціна поділки АЦП}.$$

Тепер знаючи ціну поділки можна порахувати значення, що будуть отримані з АЦП:

- для 3 В –  $3/0,0008 = 3750$ ;
- для 2,25 В –  $2,25/0,0008 = 2813$ .

Отже, знаючи контрольні значення для рівнів струму 20А і 15А у регуляторі, можна їх використати у програмі для перевірки рівню струму.

### 3.3.7. Розрахунок керуючих сигналів системи керування

Необхідно розрахувати керуючі сигнали системи керування, що призначені для відкривання та закривання силових та шунтуючих транзисторів. Керуючі сигнали будуть надходити до силових та шунтуючих транзисторів кожної секції СОР, тому враховуючи що таких секцій 16 і на кожну секцію потрібно виділити 2 порти, виходить що всього потрібно виділити 32 порти для керуючих сигналів. Розрахунки будуть виконані для однієї секції СОР, керування якої буде проводитися з портів PB2 та PE7.



ПЗ буде написана методом процедурного програмування.

На початку програми виконується ініціалізація портів, налаштування аналого-цифрового перетворювача, ініціалізація таймеру та ін. За початок роботи відповідає наступна функція:

```
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOE_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOD_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,          Driver1_TOR1_Pin|Driver2_TOR1_Pin,
GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE,
Driver1_TOR2_Pin|Driver2_TOR2_Pin|GPIO_PIN_9|GPIO_PIN_10
                        |GPIO_PIN_11|GPIO_PIN_12, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pins : Driver1_TOR1_Pin Driver2_TOR1_Pin */
    GPIO_InitStruct.Pin = Driver1_TOR1_Pin|Driver2_TOR1_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pins : Driver1_TOR2_Pin Driver2_TOR2_Pin PE9 PE10
PE11 PE12 */
    GPIO_InitStruct.Pin = Driver1_TOR2_Pin|Driver2_TOR2_Pin|GPIO_PIN_9|GPIO_PIN_10
                        |GPIO_PIN_11|GPIO_PIN_12;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOE, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pin : PD8 */
    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_8;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStruct);
}
```



Згідно алгоритму основна частина написана наступним чином:

```

while (1)
{
    int i = GET_VALUE_OF_CURRENT();
    if(i > 20)
    {
        HAL_TIM_Base_Start(&htim6);    //turn on timer
        HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim6);    //turn on timer

handler

        TURN_ON_PWM();    //turn on PWM mode
        int time = GET_TIME_FROM_TIMER();
        if(time >= 2)
        {
            SHORT_CIRCUIT_PROCEDURE();
        }
        else
        {
            HAL_TIM_Base_Stop(&htim6);    //turn off timer
        }
    }
}

```

Отже, за отримання значення струму в регуляторі відповідає наступна функція:

```
int GET_VALUE_OF_CURRENT()    //get value of current from ADC
{
    HAL_ADC_Start(&hadc1); //started ADC
    HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 100); //wait for
conversion

    int result = (HAL_ADC_GetValue(&hadc1)); //get value
    HAL_ADC_Stop(&hadc1); //stoped ADC

    int u = result*3/3750;
    int i = u*2000/300;
    return i;
}
```

В даній функції спочатку вмикається аналого-цифровий перетворювач.

Якщо при перевірці рівня струму визначається, що струм більше за 20А, то відповідно до алгоритму, вмикається таймер і СОР переводиться в режим широтно імпульсної модуляції. Якщо під час режиму ШІМ таймер доходить до 2мс, то автоматично спрацьовує переривання роботи в даному режимі та всі секції СОР ставляться на паузу, відповідно до алгоритму. Після стабілізації струму і виходу з режиму ШІМ виконується перевірка таймеру і якщо пройдений час менший за 2мс, то СОР переходить до основного режиму роботи; якщо пройдений час більший за 2мс, то всі секції СОР переходять на паузу для уникнення короткого замикання в навантаженні.

За роботу СОР в ШІМ режимі відповідає функція:

```
void TURN_ON_PWM()
{
    while(1){

        MAX_CURRENT_MODE();
        MIN_CURRENT_MODE();

        int i = GET_VALUE_OF_CURRENT();
        if(i < 20) {
            return;
        }
    }
}
```

Функція працює наступним чином: спочатку відпрацьовує режим високого струму, в якому закорочуються всі струмообмежуючі регулятори і після зменшення струму поділки 15А відпрацьовує режим низького струму, в якому всі струмообмежуючі регулятори відкриваються і після перевищення струму рівня 15А відбувається вихід із функції режиму низького струму. Далі знову відпрацьовує перевірка струму в регуляторі і якщо струм не перевищив рівень 20А, то відбувається вихід із режиму широтно імпульсної модуляції. Реалізація функцій режиму високого і низького струму:

```
void MAX_CURRENT_MODE() {
    //close power transistors
    //open blocking transistors
    while(1) {
        int i = GET VALUE OF CURRENT();
```

```

        if(i < 15) {
            return;
        }
    }
}

void MIN_CURRENT_MODE() {
    //open power transistors
    //close blocking transistors
    while(1) {
        int i = GET_VALUE_OF_CURRENT();
        if(i > 15) {
            return;
        }
    }
}

```

За включення режиму паузи відповідає наступна функція:

```

void SHORT_CIRCUIT_PROCEDURE()
{
    //close power transistors
    //open blocking transistors
    HAL_Delay(10);
    //open power transistors
    //close blocking transistors
}

```

Дана функція працює наступним чином: спочатку закриваються силові транзистори СОР, потім відкриваються шунтуючі, після цього відпрацьовує пауза на 10мс і згідно до алгоритму, всі СОР переходять в основний режим роботи.

Для того, щоб дана програма оброблювала всі 16 секцій СОР, вона буде виконуватися в операційній системі FreeRTOS. Ця багатозадачна операційна система реального часу (ОСРВ) призначена для спеціалізованих мікропроцесорних систем керування, моніторингу і контролю. Її концепція розробки полягає в тому, що така система буде працювати, будучи вбудованою безпосередньо в пристрій, яким вона керує.

### **Висновки до розділу:**

1. Для зручності кор проекту було згенеровано програмою STM32CubeMX.
2. В якості редактору програмного забезпечено було обрано редактор Keil uVision.
3. В якості підходу програмування було обрано процедурне програмування.
4. Програмне забезпечення було написано відповідно до алгоритму роботи системи керування на мові програмування C++.
5. Повний лістинг програми наведено у додатку А.

						68

#### 4. ПРОЕКТУВАННЯ ПЕЧАТНОЇ ПЛАТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Для розробки печатної плати обрано програмне забезпечення EAGLE. Дана програма є системою проектування схем електричних принципів та печатних плат. Ця система проектування надає бібліотеку компонентів, схемний редактор, редактор печатних плат, редактори пристроїв для створення нових компонентів, автоматичне трасування печатних плат та САМ-процесор, тобто перетворюючий файл печатної плати в серію файлів для її подальшого виготовлення.

Для розробки печатної плати спочатку було розроблено схему електричну принципову системи керування в програмі EAGLE. Для цього було скачано бібліотеку мікроконтролерів STM32 з офіційного сайту виробника[27]. З електронних компонентів, таких як резистор, конденсатор, мікроконтролер, кварцовий резонатор та конектор було зібрано схему електричну принципову. На схемі відображено підключення живлення до мікроконтролера, включення кварцового резонатора, включення зворотного зв'язку та керуючі виводи.

Конектори, що включені через резистори призначені для керуючих сигналів. Так як секцій струмообмежуючого регулятора 16 і фізично знаходяться вони окремо один від одного, на печатній платі будуть тільки конектори, через які можна підключити всі секції СОР.

Конектори, що включені без резисторів до мікроконтролера призначені для включення зворотного зв'язку.

Схема електрична принципова системи керування зображена на рис.4.1.

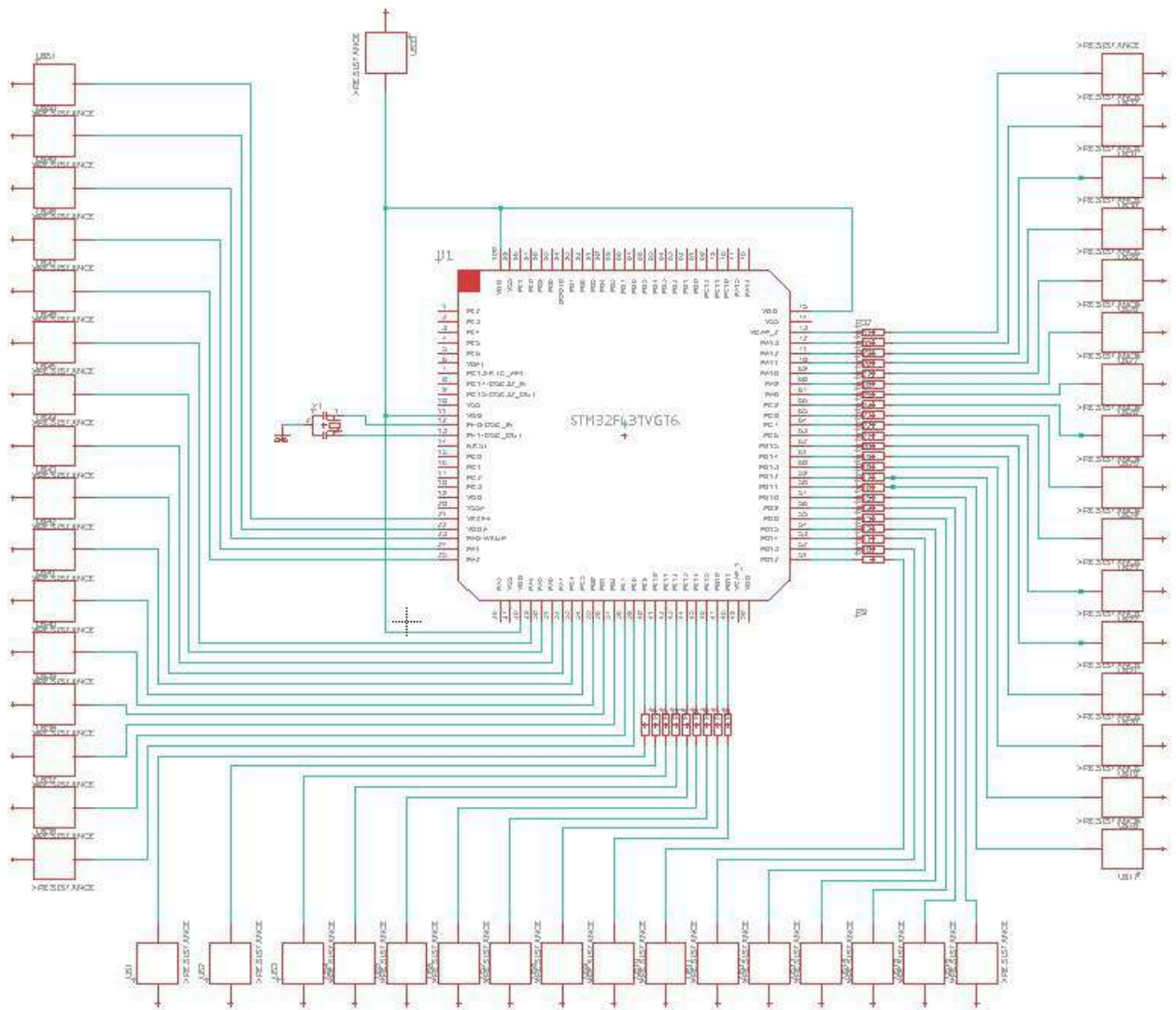


Рис.4.1. Схема електрична принципова печатної плати системи керування.

На основі принципової електричної схеми у програмному забезпеченні Eagle виконано модель печатної плати з одностороннім трасуванням. Печатна плата зображена на рис.4.2.

Способом виготовлення печатної плати обрано позитивний комбінований, який вважається основним при виготовленні односторонніх друкованих плат [29]. Перевагою даного методу в порівнянні з негативним є хороша адгезія провідника, підвищена надійність монтажних і перехідних отворів, високі електроізоляційні властивості. Останнє пояснюється тим, що при тривалій обробці в хімічно агресивних розчинах діелектрична підстава захищена фольгою.

Технологічний процес виготовлення друкованої плати комбінованим позитивним методом складається з наступних етапів [30]:

- заготівля з фольгового діелектрика;
- нанесення фоторезистів і експонування через фотошаблон;
- прояв захисного рельєфу;
- хімічне міднення;
- гальванічне осадження міді;
- гальванічне нанесення захисного покриття;
- видалення фоторезистів;
- підбурювання фольги.

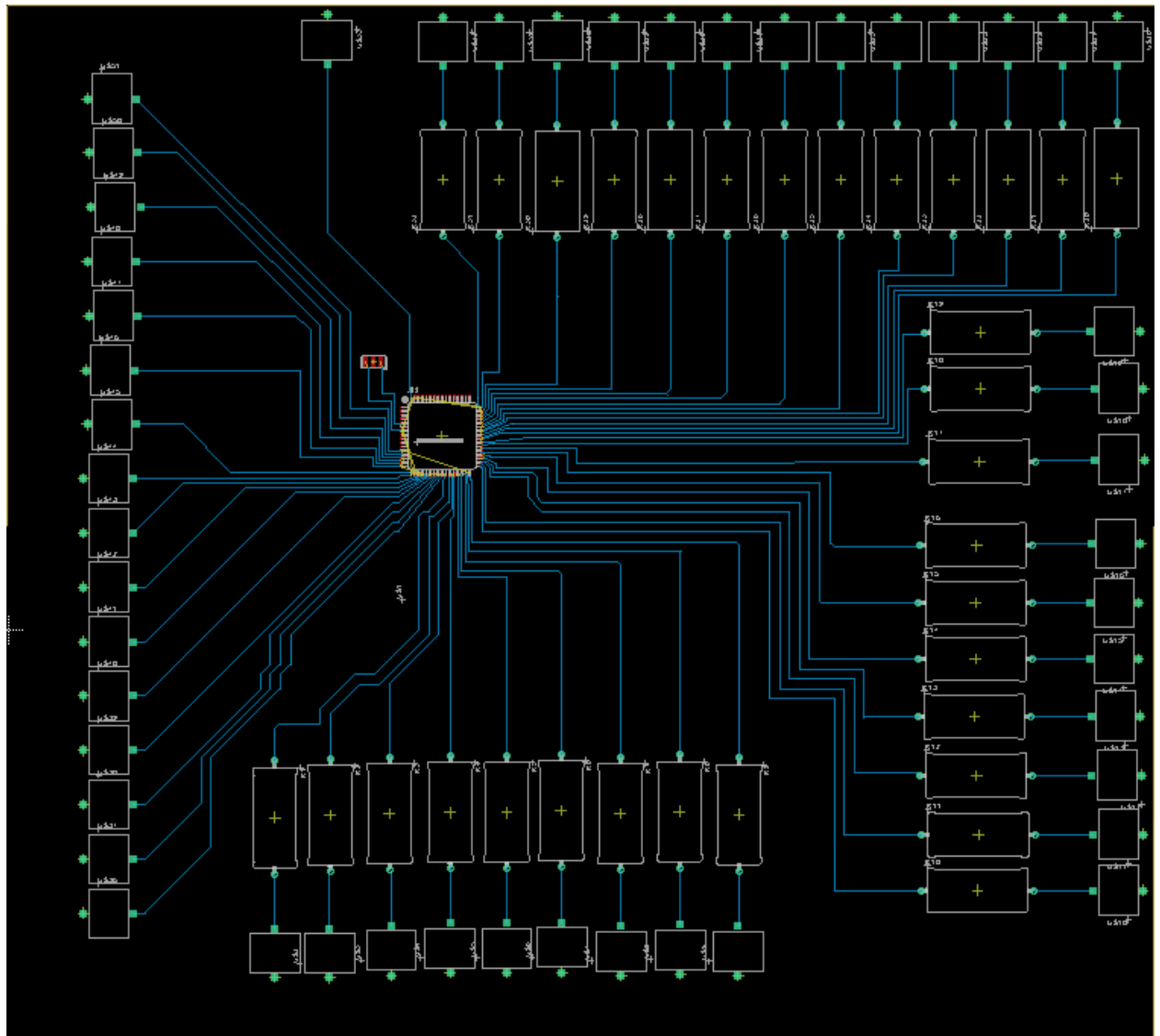


Рисунок 4.2 – Печатна плата системи керування

Заготівля з фольгованого склотекстоліти або гетинаксу покривається шаром фоторезиста. Фоторезист – це високомолекулярна сполука, яка змінює свої властивості під дією ультрафіолетового випромінювання. З одного боку, зміщення спектральної чутливості в короткохвильову область спектра - це добре, тому що дозволяє обходитися без темного приміщення і працювати при світлі звичайних ламп розжарювання. З іншого боку, чутливість до ультрафіолетових променів викликає необхідність використання ртутних ламп в кварцовому балоні, які менш зручні в експлуатації, ніж звичайні. Під дією випромінювання відбувається фотополімеризація шару, в результаті якої пропадає розчинність в звичайних розчинниках, тому після прояву на освітлених ділянках поверхні утворюється захисний рельєф, а на затемнених - шар фоторезиста залишається без зміни і в подальшому вимивається [30].

Експонування фоторезистов, нанесених на поверхню фольгированного діелектрика, проводиться через фотошаблон, в якому система прозорих і непрозорих ділянок утворює необхідний малюнок провідників і контактних майданчиків. При наступному прояві видаляється частина фоторезиста і утворюється захисний рельєф, з малюнком і розмірами, що визначаються фотошаблоном [29]. При цьому методом захисний шар фоторезиста зберігається на пробільних ділянках, а провідники і контактні площадки залишаються відкритими. Оскільки фотошаблон при подібному процесі відповідає позитивному зображенню друкованої плати (темні провідники на світлому фоні), то і сам метод називають позитивним [30].

Після прояви малюнка схеми плати покривають шаром лаку для захисту від механічних пошкоджень і направляють на свердління отворів. Ця операція порушує безперервність процесу, так як сушка і задубління лаку займають кілька годин. Потім свердлять перехідні і монтажні отвори і виробляють їх хімічне міднення. Далі слід видалення захисного шару і гальванічне осадження міді на провідники, контактні площадки і в отвори.



При електролітичному нарощуванні з'єднання з катодом здійснюється суцільним шаром мідної фольги, що покриває діелектрик. Цей шар захищає також поверхню діелектрика від впливу електроліту [30].

На наступному етапі поверх мідного шару гальванічним способом наносять захисне покриття зі сплаву олово-свинець, після чого з пробільних місць видаляють захисний шар фоторезиста і стравлюють фольгу.

Виготовлення ПП завершується хімічною обробкою захисного покриття (висвітленням) для поліпшення його здатності до пайки (остаточна відмивання і консервація).

## Висновки до розділу :

1. Для моделювання печатної плати обрано програмне забезпечення EAGLE.
2. Виконано модель схеми електричної принципової та на її основі створено модель печатної плати із одностороннім трасуванням.
3. Обрано комбінований метод виготовлення печатної плати.
4. Описано процес виготовлення печатної плати на основі комбінованого методу.

## 5. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Розглянемо електромагнітні процеси, що протікають в регуляторах ТОС в різних режимах роботи джерела живлення і обмежимося при цьому розглядом регулятора в односекційному виконанні, тобто з одним перетворювачем понижуючого типу. Для застосування чисельних методів моделювання процесів використаємо в якості силових транзисторів ідеальні ключі, вхідну напругу регуляторів промодельємо джерелом постійної напруги  $E_1 = 2\text{кВ}$  (рис.5.1).

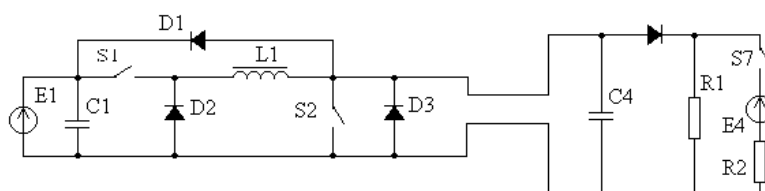


Рисунок 5.1 – Схема регулятора в односекційному виконанні

Технологічне навантаження моделюється в стаціонарному режимі активним опором  $R1 = 133 \text{ Ом}$  і внутрішньою ємністю  $C4 = 1 \text{ нФ}$ . Величина опору  $R1$  визначає номінальний робочий струм технологічного навантаження. Виникнення режиму короткого замикання в технологічному навантаженні моделюється включенням ключа  $S7$ . Протягом цього режиму струм короткого замикання (струм горіння дуги) визначається активним опором  $R2 = 2 \text{ Ом}$ , напруга горіння дуги моделюється джерелом напруги  $E4 = 60 \text{ В}$ . Процеси, які відбуваються в регуляторі, розглянемо для випадку, коли всі шунтуючі транзистори мають нульову затримку при відмиканні. Тут зауважимо, що проблема у несинхронності відмикання шунтуючих транзисторів в секціях ТОС не актуальна, якщо в алгоритмі роботи присутній інтервал часу селекції, що передує інтервалу відмикання

транзисторів. Дійсно, якби система управління джерелом формувала інтервал паузи (шунтуючі транзистори відкриті) відразу ж при виникненні короткого замикання (виникненні пробою) в навантаженні, то внаслідок того, що фронт спадання вихідної напруги на джерелі може мати деяку затримку через паразитні параметри кабелю між джерелом і навантаженням, при несинхронності відмикання транзисторів на них можуть формуватися перенапруги. Це означає, що при подачі команди на відмикання до транзисторів з більш пізнім часом включення може бути докладено залишкову напругу від величини  $U_{вих}$  (близько 30кВ). Однак в алгоритмі роботи джерела присутній інтервал часу селекції (порядку сотень мікросекунд), під час якого при виникненні пробою в навантаженні вихідна напруга джерела спадає до рівня напруги горіння дуги (порядку 60-80В), і команда на відмикання шунтуючих транзисторів на заданий час паузи надходить при зниженій вихідній напрузі, що не несе жодних загроз для транзисторів при їх несинхронному відмиканні. Можливі ж короткочасні перенапруги на шунтуючих транзисторах, що виникають з інших причин, мають можливість бути обмеженими завдяки діоду D1, підключеному до джерела Е.Р.С. Е1 спільно з конденсатором С1.

На діаграмах рис.5.2 зображені наступні сигнали, отримані після моделювання процесів за допомогою чисельних методів:

S2, S7 - стан ключів відповідно S2, S7, нульове значення - ключ закритий, середнє арифметичне значення - ключ відкритий;

IL1 - струм дроселя L1; IBIX - вихідний струм регулятора; ID1 - струм діода D1;

US1 - напруга на силовому ключі S1; UBIX - вихідна напруга регулятора.

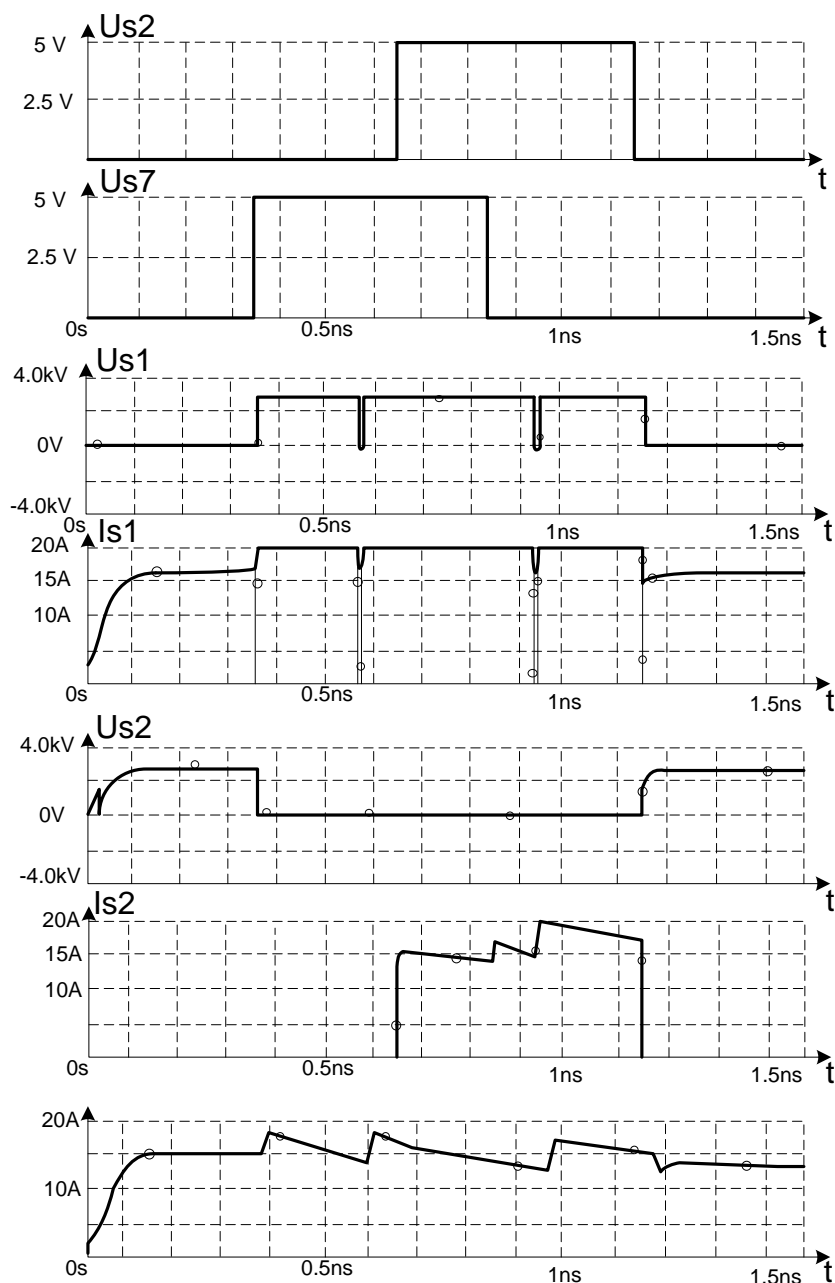


Рисунок 5.2 (а) –Діаграма моделювання електромагнітних процесів  
COP у програмному забезпеченні OrCad

Для прикладу тимчасові параметри інтервалів селекції і паузи обрані наступними: на рис.5.2, а й рис.5.2, б час селекції (моделюється ключем S7) становить  $T_c = 300\text{мкс}$ , час паузи (моделюється ключем S2) становить  $T_p = 650\text{мкс}$ . Такі тимчасові параметри обрані для того, щоб показати характерні режими роботи регулятора.

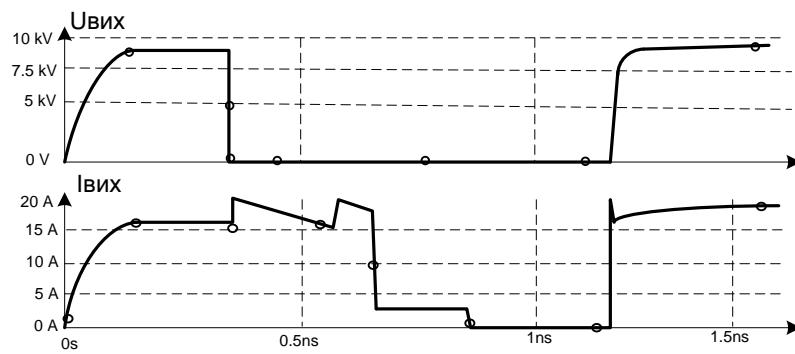


Рисунок 5.2 (б) - Діаграма моделювання електромагнітних процесів  
COP у програмному забезпеченні OrCad

Як видно з діаграм, після подачі вхідної напруги на регулятор, його вихідні струм і напруга монотонно зростають до номінальних значень. У момент часу  $T1 = 350\text{мкс}$  в навантаженні з'являється коротке замикання (пробою), що моделюється включенням ключа S7. З цього моменту ключ S1 переходить в релейний режим, струм дроселя рівний по величині вихідного струму, обмежений у межах 15 - 20A. При цьому напруга на шунтуючих ключах падає до напруги горіння дуги. Період часу від моменту  $T1$  до моменту  $T2$  - це інтервал часу селекції, який використовується для розпізнавання характеру короткого замикання (дуги). Якщо до цього моменту пробій у навантаженні не зник, а перейшов в стійку дугу, то в момент  $T2 = 650\text{мкс}$  відкривається ключ S2 і закривається ключ S1. Через шунтуючий ключ S2 протікає весь струм дроселя. Від моменту часу  $T2$  до моменту часу  $T3$  триває інтервал паузи, необхідний для руйнування дуги в технологічній навантаженні. У момент часу  $T3$ , коли закінчується інтервал паузи, вихідний струм регулятора набуває значення струму дроселя, який протікав до цього через шунтуючий ключ. Як підтверджують наведені діаграми, постійна часу наростання і спаду струму дроселя L1 на етапах накопичення і віддачі енергії в навантаження визначається активним опором ланцюга протікання цього струму. На різних інтервалах роботи коло протікання струму

дроселя різне, тому маємо різний нахил кривої струму. Особливо це помітно при варіюванні резистора  $R_2$ , що визначає струм короткого замикання (струм горіння дуги). При опорі  $R_2 = 20 \text{ Ом}$  (рис.2.11, а) крутизна нахилу кривої струму дроселя набуває більш високе значення, в порівнянні з варіантом, коли  $R_2 = 2 \text{ Ом}$  (рис.2.11, б). Тому в першому варіанті на інтервалі селекції частота роботи релейного елемента регулятора вище. Так як частота роботи релейного елемента, таким чином, може змінюватися в залежності від характеристик дугового проміжку і його активного опору, то виходячи з умови неперевищення максимальної частоти перемикання елементів регулятора і забезпечення необхідних порогів спрацьовування релейного елемента слід розраховувати необхідне значення індуктивності  $L_1$  дроселя регулятора.

## 5 СТАРТАП-ПРОЕКТ

### 5.1 Опис ідеї проекту

Суть стартап-проекту полягає: запропонувати вдосконалену систему керування для існуючого джерела живлення ДЖЕН 30-15. Зміст ідеї та визначення характеристик ідеї стартапу наведемо в табл. 5.1 та табл. 5.2 [34].

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Запропонувати вдосконалену систему керування для існуючого джерела живлення ДЖЕН 30-15	Електронно-променеве устаткування	1.Зменшення собівартості 2.Єдиний блок СК 3.Автоматизована система керування, що має більшу точність регулювання, можна змінювати параметри навантаження, стійка до змін.

Таблиця 5.2 – Визначення характеристик ідеї проекту [34]

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропонований метод	Загальновживаний метод			
1.	Пропозиція продажу або оренди програмного забезпечення для системи керування	Дає змогу	Дає змогу	Необхідно придбати ліцензію для всього програмного забезпечення	Рівень цін продажу та оренди не задовільняє малі телеканали	Рішення є дешевшим ніж аналоги конкурентів
2.	Підтримання високої якості регулювання струму	Дає змогу	Не дає змогу	Не гарантується 100% якість для всіх класів ВП	Потребує додаткових затрат на периферію	Забезпечує збереження вільного простору

### 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

У таблиці 5.3 показано оцінку технологічної здійсненності ідеї

						79

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту [34]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Удосконалена система керування струмообмежувачем	Спеціалізоване програмне забезпечення для процесу керування	Наявна	Доступна
2	Юним регулятором джерела живлення для електронно-променевого устаткування	Технологія регулювання струму із використанням IGBT н\п приладів	Необхідно розробити	Доступна при обмеженому бюджеті
3		Розробка алгоритму роботи КТЗЗ	Необхідно розробити	При обмеженому бюджеті недоступна

У таблиці 5.4 показано попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту [34].

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	300000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Зацікавлення потенційних клієнтів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Ліцензування на електронно-променеве устаткування
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	$300000/210000 = 143\%$

						80



проекту. [34]

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Забезпечення надійного процесу регулювання струму	Компанії, що займаються продажами електро- променевого устаткуванн я	Рівень очікування якості передавання відеоконтенту	Відповідність результату найвищим стандартам якості
2	Забезпечення довготривалого зберігання	Компанії, що займаються продажами електро- променевого устаткуванн я	Кожна з потенційних цільових груп має свої вимоги до стандартів відеозображення	Забезпечення хорошої якості регулювання струму

У табл. 5.6 показані фактори загроз реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.6. Фактори загроз [34]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Незацікавленість клієнтів	Внаслідок невдалого маркетингу клієнт може не зацікавитись послугами	Внесення додаткових сервісних послуг
2	Втрата конкуренції	Втрата рангу надійного поставника	Якісне та кількісне нарощування інтенсивності та грамотна цінова політика

У табл.5.7 показано фактори можливостей при реалізації стартап- проекту [34].

### Таблица 5.7. Факторы возможностей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
----------	--------	------------------	--------------------------

1	Перехід до домінування на ринку електроживлення	Зростання попиту	Якісне та кількісне нарощування потужностей
2	Імплементація технологій в існуючі системи керування	Зростання попиту внаслідок зростання об'ємів закупівель	Якісне та кількісне нарощування потужностей

У таблиці 5.8 визначено особливості конкурентного середовища та його вплив на впровадження проекту.

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [34]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1.Конкуренція	Використання вже існуючих технологій	Стандартизація на високому рівні
2.Локальний	Відсутність єдиного національного постачальника послуг	Окремий підхід до кожної локальної ділянки
3.Міжгалузева	Відсутня	Відсутня
4.Товарно-видова	Застосування стандартизованих технологій	За необхідності, використання загальноновживаних апаратних та програмних засобів
5.Цінова	Застосування спеціалізованих комплексів, які мають значну ціну	Можливість заощадити за допомогою застосування загальноновживаних апаратних засобів
6.Марочна	Кожна діагностика має бути стандартизованою	Отримання переваги на ринку електроживлення

У таблиці 5.9 показано аналіз конкуренції проекту в галузі за М. Портером [34]

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Апаратні постачальники	Необхідність пошуку постачальників	Залучення малопопулярних постачальників	Незалежність у прийнятті клієнтських рішень	Надання переваги більш авторитетним апаратним рішенням

Висновки:	Середня	Можливість виходу на ринок є	Постачальники диктують цінову політику на обладнання	Клієнти диктують вимоги до якості	Обмеження існують лише у разі відмови від діагностики
-----------	---------	------------------------------	--	-----------------------------------	---

У табл. 5.10 показано факти конкурентноспроможності та їх обґрунтування [34].

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Раціональніший ціновий показник	Можливість більш раціонально використати ресурси на покращення якості електроживлення
2	Надання сервісних послуг	Сервісна підтримка апаратної та програмної частини

У табл. 5.11 наведено сильні та слабкі сторони проекту [34].

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Раціональніший ціновий показник	13		+					
2	Надання сервісних послуг	12			+				
3	Періодична діагностика	7					+		
4	Необхідність залучення висококваліфікованих кадрів	18						+	

У табл.5.12 наведено SWOT-аналіз стартап-проекту [34].

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: раціональний ціновий показник, надання сервісних послуг	Слабкі сторони: періодична діагностика, необхідність залучення висококваліфікованих кадрів
Можливості: Перехід до ексклюзивного застосування нового методу, Імплементация методу в існуючі аудіовізуальні комплекси	Загрози: Незацікавленість клієнтів, Втрати монополії



Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Використання альтернативних технологій та пристроїв	Встановлення нового стандарту якості	Зацікавлення та залучення гігантів у галузі електроживлення	Стратегія диференц іації

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки наведено у табл.5.16 [34].

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так	Шукати нових та забирати існуючих	Не буде	Стратегія виклику лідера

Визначення стратегії позиціонування наведено у табл. 5.17.

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування [34].

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока якість послуг	Стратегія диференціації	Новизна, гарант якості, точність дослідження	Якість, надійність, точність
2	Мінімальні витрати	Стратегія лідерства по витратах	Універсальність запропонованого рішення	Дешевизна, універсальність

## 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Ключові переваги концепції потенційного товару наведено у табл. 5.18. Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Висока якість, надійність	Надійність
2	Дешевизна	Раціональне використання коштів, дешевше обладнання	Дешевизна

Визначено три рівні моделі товару. Сутність та складові рівнів товару наведено у табл. 5.19 [34].

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Якісний товар та послуги, стандартизована якість послуг та обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1)Вартість обслуговування,	1) М	1)Е
	2)Кількість комплектів обладнання	2) М	2)
	3)Строк безвідмовної праці	3) М	Пр
	4)Технологічна собівартість товару	4) М	3)Н
			д
			4)Тх
	Якість: міжнародні стандарти якості, постійна підтримка обладнання		
	Доставка, встановлення та налаштування		
	Марка: Електроживлення		
III. Товар із підкріпленням	До продажу – обладнання, встановлення		
	Після продажу – сервісна підтримка		

За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання:  
специфічна методика обробки даних [34].

Визначення меж встановлення ціни на послугу наведено у табл. 5.20

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни



## Висновки до розділу

1. Комерціалізацію стартап-проекту щодо розробки та впровадження удосконаленої системи керування, можна вважати доцільною. На дану пропозицію на ринку електроживлення присутній попит, наразі він задовольняється товарами замінниками та більш дорогими рішеннями при меншій ефективності використання, саме тому важливо зайняти нішу конкурента у якості поставника вигідного продукту, порівнюючи з конкурентами.

2. Впровадження є перспективним, адже основними групами клієнтів є масштабні компанії електронно-променевого спрямування і після набуття достатньої авторитетності можливе охоплення у масштабах міжнаціональних ринків. Конкурентноспроможність проекту обумовлена меншою ціною на повний продукт та високою якістю відеозображення при мінімальній швидкості бітового потоку, коли конкуренти за цим параметром у даних умовах програють. Це вигідно вирізняє запропоноване рішення, власне, і є основним критерієм входження на ринок.

3. Обраною альтернативою впровадження є пошук альтернативних технологій та пристроїв для побудови систем керування джерелом живлення для електронно-променевого устаткування. Імплементація проекту доцільна, оскільки рентабельність та зацікавленість потенційних груп клієнтів створює досить сприятливі умови для розвитку проекту.



## ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації було розглянуто методи регулювання струму в джерелах електроживлення, що призначені для електронно променевого устаткування. Досліджено метод обмеження струму за рахунок секціонування вторинної обмотки трансформатора із використанням сучасних напівпровідникових приладів. Розроблено мікропроцесорну систему керування для спеціалізованого джерела живлення, що розроблений на основі обраного методу.

Розроблена система керування має наступні переваги над аналоговими СК: єдиний і загальний блок СК, легкість у підтримці, нижча собівартість, параметри навантаження можна задавати, завжди відкрита до змін, точність.

У виборі технічного обладнання нової системи керування обрано мікроконтролер STM32F405VG, який задовольняє процес виконання алгоритму керування як з технічної сторони, так і з фінансової.

Розроблено алгоритм керування струмообмежуючим регулятором, на основі якого створено програмне забезпечення, для правильної роботи мікропроцесорної системи керування. Код програми написаний на мові високо рівня C++, яка є широко поширеною в галузі мікропроцесорної техніки. Виконано розрахунки елементів мікроконтролера для підключення його до електричної принципової схеми струмообмежуючого регулятора.

Виконано модель печатної плати для системи керування струмообмежуючого регулятора джерела живлення комбінованим методом та описано процес подальшого її виготовлення.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Електронно променеві технології URL:  
<http://jak.iblog.in.ua/articles/elektronno-promenevi-tehnologii-1.html>
2. Методы регулирования и стабилизации тока нагрузки сварочных инверторов URL: [http://www.power-e.ru/2008\\_4\\_67.php](http://www.power-e.ru/2008_4_67.php)
3. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева URL:<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/96137/11-Martynov.pdf>
4. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование URL: [http://www.nanoindustry.su/files/article\\_pdf/3/article\\_3388\\_175.pdf](http://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/3/article_3388_175.pdf)
5. Електронний промінь у технології URL:  
<http://ukrefs.com.ua/print:page,1,90834-Elektronnyi-luch-v-tehnologii.html>
6. Сварочный источник питания URL:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Сварочный\\_источник\\_питания](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сварочный_источник_питания)
7. Джерела живлення зварювальної дуги змінного струму URL:  
<http://jak.magey.com.ua/articles/dzherela-zhivlennja-zvarjuvalnoi-dugi-zminnogo.html>
8. Способы регулирования сварочного тока URL:  
<https://svaring.com/welding/prinadlezhnosti/reguljator-svarochnogo-toka>
9. Схемотехника управления током сварочного пучка электронов URL: [http://www1.nas.gov.ua/pwj/beam/cebwc\\_RUS.pdf](http://www1.nas.gov.ua/pwj/beam/cebwc_RUS.pdf)
10. Регулятор зварювального струму – способи регулювання вольт амперної характеристики зварювальних напівавтоматів URL:  
<http://stroytechnology.net/zroby-sams/7384-regylator-zvaryvalnogo-strumy.html>
11. Регулювання зварювального струму URL:  
<http://studvesna73.ru/07/23/7543/>
12. Регулирование напряжения трансформаторов URL:  
<https://electrono.ru/transformatory-i-reaktory/69-regulirovanie-napryazheniya-transformatirov>



